

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Бурау Н. І.

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

**за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології**

на тему: «Промисловий робот. Розробка маніпуляційної системи.»

Виконала:

студентка III курсу, групи ПГ-пб1

Лещук Марина Сергіївна

Керівник:

доцент, к. т. н. Лакоза С.Л.

Консультант з:

Рецензент:

ст. викл. Божко К. М.

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Реферат

В даному дипломному проекті розглядається макет промислового маніпулятора, як можливість демонстрації функціоналу повноцінного промислового робота. При виконанні дипломного проекту були розглянуті різноманітні конструкційні типи та види промислових маніпуляторів. Особливу увагу було приділено динамічному дослідження макету промислового маніпулятора, що дозволило знайти розташування центрів мас ланок маніпулятора та обчислити тензори інерції центрів мас ланок. Завершальним етапом було створення 3D моделі, деталювання та складального креслення маніпулятора.

Ключові слова: Промисловий робот, макет, маніпулятор, динамічне дослідження, ланки, центр мас, тензор інерції, кінематика.

Реферат

В данном дипломном проекте рассматривается макет промышленного манипулятора, как возможность демонстрации функционала полноценного промышленного робота. При выполнении дипломного проекта были рассмотрены различные конструкционные типы и виды промышленных манипуляторов. Особое внимание было уделено динамическому исследованию макета промышленного манипулятора, что позволило найти расположение центров масс звеньев манипулятора и вычислить тензоры инерции центров масс звеньев. Завершающим этапом было создание 3D модели, детализировки и сборочного чертежа манипулятора.

Ключевые слова: Промышленный робот, макет, манипулятор, динамическое исследование, звенья, центр масс, тензор инерции, кинематика.

Abstract

In this graduation project, a model of an industrial manipulator is considered, as an opportunity to demonstrate a functional full-fledged industrial robot. During the execution of the diploma project, various constructional types and types of industrial manipulators were considered. Particular attention was paid to the dynamic study of the layout of the industrial manipulator, which allowed finding the location of the centers of masses of the manipulator and calculating the inertia tensors of the centers of masses. The final step was to create a 3D model, detailing and assembly drawing of the manipulator.

Key words: industrial robot, model, manipulator, dynamic research, links, center of mass, tensor of inertia, kinematics.

Зміст

Вступ	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	9
1.1. Типи маніпуляторів	11
1.2. Класифікація маніпуляторів	11
1.3. Системи управління маніпулятором	14
1.4. Способи моделювання маніпуляторів	16
1.5. CAD-системи	19
1.5.1. AutoCad	20
1.5.2. Bricscad	22
1.5.3. SolidWorks	23
1.5.4. Компас-3D	24
1.5.5. CATIA	26
1.5.6. Siemens NX	28
1.5.7. PTC Creo	31
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК МАНІПУЛЯТОРА	34
2.1. Кінематика руху маніпулятора	34
2.1.1. Пряма задача кінематики, параметри Денавіта-Хартенберга	35
2.1.2. Зворотна задача кінематики	37
2.2. Розрахунок інерційних характеристик ланок	38
2.3. Опис конструкції маніпулятора	47
Висновок	53
Список використаної літератури	54

ВСТУП

Маніпулятор - це сукупність просторового важільного механізму і системи приводів, що здійснює під управлінням програмованого автоматичного пристрою або людини-оператора дії (маніпуляції), аналогічні діям руки людини.

Поява механічних маніпуляторів, а потім систем числового програмного керування привело до створення промислових роботів - програмованих маніпуляторів, призначених для різноманітних технологічних операцій.

Промислові роботи призначені для заміни людини при виконанні основних і допоміжних технологічних операцій в процесі промислового виробництва. При цьому вирішується важливе соціальне завдання - звільнення людини від робіт, пов'язаних з небезпеками для здоров'я або з важкою фізичною працею, а також від простих монотонних операцій, що не вимагають високої кваліфікації. Гнучкі автоматизовані виробництва, що створюються на базі промислових роботів, дозволяють вирішувати завдання автоматизації на підприємствах з широкою номенклатурою продукції при малосерійному і штучному виробництві. Промислові роботи є важливими складовими частинами сучасного промислового виробництва [1].

Перші промислові роботи почали створювати в середині 50-х років XX століття в США. У 1954 році американський інженер Дж. Девол запатентував спосіб управління вантажно-розвантажувальних маніпулятором за допомогою змінних перфокарт, тобто отримав патент на робот промислового призначення. Разом з Д. Енгельберга в 1956 р він організував першу в світі компанію з випуску промислових роботів. Її назва «Unimation» (Юнімейшн) є скороченням терміну «Universal Automation» (універсальна автоматика).

У 1959 році фірма «Консолідейтед Корпорейшн» (США) опублікувала опис маніпулятора з числовим програмним керуванням, а в 1960-1961 рр. в американській пресі з'явилися перші повідомлення про маніпулятори «Transferobot» і «Eleximan», які призначені для автоматизації складальних робіт. У 1962 році в США були створені перші в світі промислові роботи «Юнімейт» фірми "Юнімейшн Інкорпорейд" і "Версатран» фірми «АМФ Версатран». Їх схожість з людиною обмежувалося

наявністю маніпулятора, що віддалено нагадує людську руку. Деякі з них працюють до цих пір, перевищивши 100 тисяч годин робочого ресурсу.

Промисловий робот «Юнімейт» мав 5 ступенів рухливості з гідроприводом і двухпальцевий захватний пристрій з пневмоприводом. Переміщення об'єктів масою до 12 кг здійснювалося з точністю 1,25 мм. В якості системи управління використовувався програмоносій у вигляді кулачкового барабана з кроковим двигуном, розрахований на 200 команд управління, і кодові датчики положення. У режимі навчання оператор ставив послідовність точок, через які повинні пройти ланки маніпулятора протягом робочого циклу. Робот запам'ятовував координати точок і міг автоматично переміщатися від однієї точки до іншої в заданій послідовності, багато разів повторюючи робочий цикл. На операції розвантаження машини для лиття під тиском «Юнімейт» працював з продуктивністю 135 деталей за годину при 2% браку, тоді як продуктивність ручного розвантаження становила 108 деталей за годину при браку до 20%.

На світовому ринку робототехніки зараз лідирують Японія і Німеччина - ці країни виробляють більше половини всієї роботизованої продукції в світі. Говорити про якісь серйозні досягнення України в цій галузі поки рано, але все ж дещо у нас роблять: є і промислові виробники, і стартапи [27].

"На даний момент в Україні ринок роботизації поки тільки зароджується. Пов'язано це, перш за все, з дуже низьким рівнем оплати праці персоналу і дуже дорогими фінансовими ресурсами. Власникам виробництв просто не вигідно автоматизувати виробництва, а дешевше найняти людей", - CEO Knn-systems Микола Кривецький [28].

Human Capital Index (Індекс людського капіталу) демонструє, на скільки освіта у різних країнах відповідає місцевим реаліям і поточним потребам місцевих роботодавців. Особливо, індекс показує, чи є навчання надмірним або недостатнім, в порівнянні з наявними можливостями працевлаштування.

Примітно, що Україна виявилася на досить високій позиції в індексі Всесвітнього економічного форуму в 2016 році. Ми займаємо 23-у позицію в світі за

якістю освіти по відношенню до потреб працевлаштування в рейтингу з Латвією і Чехією [29].

За даними компанії KNN Systems, в Україні частіше використовуються машини для автопромислової, хімічної та електронної промисловості, для процесових рідин і зварювальних робіт, фасування, упаковки, палетизації. Найбільш відомі підприємства, що застосовують готові роботи: Procter & Gamble, Henkel, АвтоЗАЗ [27].

Різні аспекти застосування промислових роботів розглядаються, як правило, в рамках типових проектів промислового виробництва: виходячи з наявних вимог, вибирається оптимальний варіант, в якому конкретизовано необхідний для даного завдання тип роботів, їх кількість, а також вирішуються питання інфраструктури живлення (силові підводки, подача охолоджуючої рідини - в разі використання рідинного охолодження елементів оснастки) і інтеграції в виробничий процес (забезпечення заготовками і повернення готового продукту в автоматичну лінію для передачі наступної технологічної операції) [2].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1. Типи маніпуляторів

Перше, з чим стикається інженер, який створює маніпулятор, - вибір його кінематичної схеми, структури його скелета. В процесі виконання операцій з об'єктами маніпулювання в більшості випадків маніпулятори імітують рух рук людини. Тому структурна схема маніпулятора повинна володіти кінематичними характеристиками, аналогічними характеристиками руки людини.

Маніпулятор повинен мати хоча б три ступені рухливості, необхідні для переміщення інструменту в будь-яку точку зони обслуговування. Кожна ступінь рухливості маніпуляційного робота управляється індивідуальним приводом, в результаті чого виконавчий орган отримує спрямований певний рух. В сучасних маніпуляторах використовують електромеханічні, гідравлічні, пневматичні або комбіновані приводи[5].

Існує велика кількість схем маніпуляторів, найбільш поширеними в промисловості є п'ять наступних схем:

Декартовий тип. Маніпулятор (рис. 1.1), що функціонує в декартовій (прямокутній) системі координат, простий в управлінні і відрізняється високою точністю дій. Захват маніпулятора поступально переміщається уздовж трьох основних осей: x , y і z (тобто зліва направо, вперед-назад і вгору-вниз) [3].

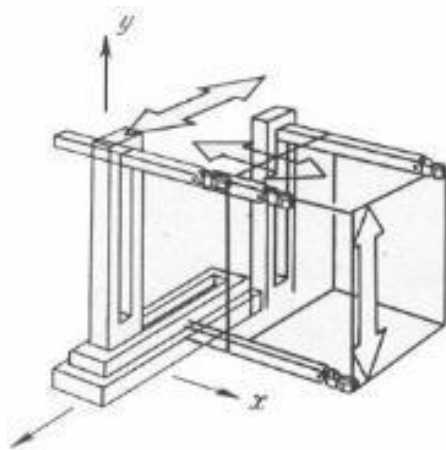


Рисунок 1.1. Маніпулятор декартового типу

Циліндричний тип. Маніпулятор (рис. 1.2), що працює в циліндричній системі координат. Його захват може висуватися і втягуватися, а також переміщатися вгору і вниз уздовж стійки. Крім того, весь вузол маніпулятора може повертатися навколо

осі підставки, але не на повний оберт, що дозволяє йому виконувати операції в навколишній циліндричній зоні[3].

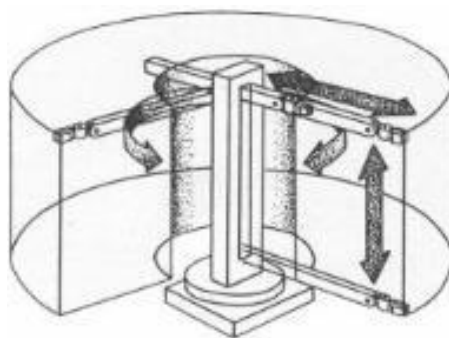


Рисунок 1.2. Маніпулятор циліндричного типу

Сферичний тип. Маніпулятор (рис. 1.3), що діє в сферичній (або полярній) системі координат. Його захват може висуватися і втягуватися. Вертикальні переміщення маніпулятора досягаються шляхом повороту його у вертикальній площині в «плечовому» суглобі. Весь вузол маніпулятора може також повертатися навколо осі підставки. Зона дії подібного маніпулятора являє собою усічену сферу. Перші моделі промислових роботів були сконструйовані саме за цим принципом[3].

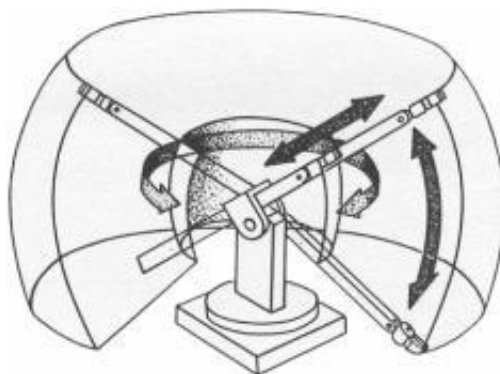


Рисунок 1.3. Маніпулятор сферичного типу

Ангулярний тип. Шарнірний маніпулятор (рис. 1.4), що діє в ангулярній системі координат, не має поступальних кінематичних пар, а має тільки обертальні кінематичні пари. Маніпулятор такого типу дуже нагадує руку людини, оскільки має «плечове» і «ліктьове» зчленування, а також «зап'ястя». Його зона обслуговування значно більше, ніж у роботів інших типів. Він здатний обходити перешкоди набагато різноманітнішими шляхами і навіть складатися, але разом з тим він виключно складний в управлінні[3].

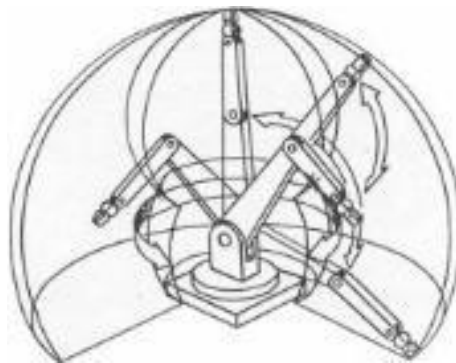


Рисунок 1.4. Маніпулятор ангулярного типу

Тип SCARA. Своєрідну схему має маніпулятор системи SCARA (рис. 1.5), що представляє собою варіант маніпулятора з циліндричною системою координат. Всі кінематичні пари цього маніпулятора розташовуються в горизонтальній площині, завдяки чому механізм здатний розгортатися подібно складаній ширмі. Його зона обслуговування має циліндричну форму[3].

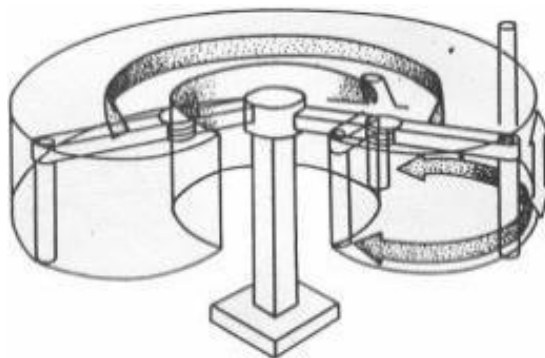


Рисунок 1.5. Маніпулятор SCARA типу

Перспективними здаються роботи ще двох типів. Перший з них, «Spine» (рис.1.6), спроектований фахівцями фірми «спайні Роботікс». У ньому використовується довгий хоботоподібний маніпулятор, що складається з безлічі сочевицеподібних дисків, які з'єднані між собою двома парами тросів, які забезпечують натяг. Троси з'єднані з поршнями гідравлічних циліндрів, які, створюючи натяг, викликають переміщення маніпулятора. Спеціальні датчики передають на систему управління інформацію про стан маніпулятора і його пензля. Такий робот відрізняється надзвичайно великою гнучкістю, значним радіусом дії і високою маневреністю[3].

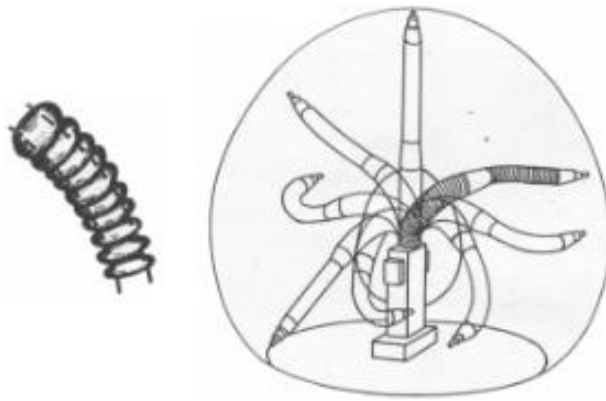


Рисунок 1.6. Маніпулятор Spine типу

Інший робот маятникового типу (рис. 1.7), IR B1000, розроблений фахівцями фірми ASEA; його маніпулятор підвішений подібно до маятника з подвійним карданним підвісом і може переміщатися по напрямних щодо поздовжньої і поперечної осей. За твердженням фахівців фірми ASEA, цей пристрій рухається в 1,5 рази швидше, ніж традиційні маніпулятори, що забезпечує високу продуктивність [3].

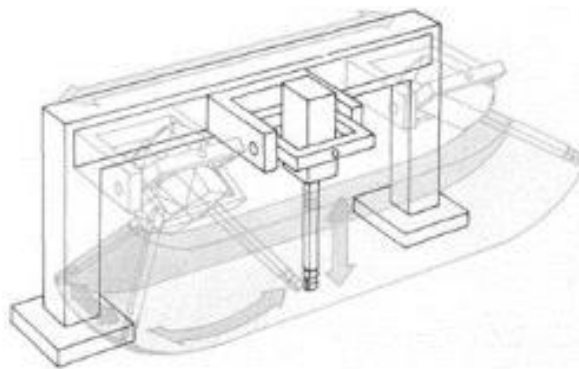


Рисунок 1.7. Маніпулятор маятникового типу

1.2 Класифікація маніпуляторів

Маніпулятори складають 85-90% всіх роботів у світі.

Класифікація роботів за призначенням в промисловості:

1) Керамічна промисловість: видавлювання керамічної сировини, завантаження вальцових (крокетних) машин, витяг сформованих виробів, складування, покриття глазур'ю шляхом занурення, нанесення глазурі пульверизатором, шліфування виробів після випалу, завантаження і розвантаження печей;

2) Скляна промисловість: завантаження і розвантаження машин;

3) Швейна промисловість: завантаження швейних машин;

- 4) Деревообробна промисловість: покриття лаком, складання виробів, забивання цвяхів, закручування гвинтів;
- 5) Виробництво та оброблення шкіри: завантаження машин;
- 6) Гумообробна промисловість: розпізнавання образів, маніпулювання шинами;
- 7) Обробка пластиків: завантаження сировини, розвантаження машин;

За ступенем універсальності:

- 1) універсальні (для виконання різних операцій спільно з різними видами обладнання);
- 2) спеціалізовані (виконує одну операцію з декількох можливих з різним обладнанням);
- 3) спеціальні (виконує конкретну операцію з одним типом обладнання).

По виду технологічних операцій:

- 1) здійснюють основні технологічні операції;
- 2) виконують допоміжні технологічні операції з обслуговування технологічного обладнання (засоби автоматизації).

За показниками, визначальним їх конструкцію:

- 1) тип приводів робота (електричний, гідравлічний, пневматичний);
- 2) вантажопідйомність (надлегкі - до 1 кг; легкі - від 1 до 10 кг; середні 10,200 кг; важкі - 200,1000 кг; надважкі - понад 1000 кг);
- 3) кількість маніпуляторів (від 1 до 4 рук);
- 4) тип і параметри робочої зони маніпуляторів (прямокутна, циліндрична, сферична, кутова (ангулярна) і різні їх комбінації);
- 5) рухливість робота визначається наявністю або відсутністю у нього пристрою пересування (рухливий або стаціонарний).
- 6) за способом розміщення стаціонарні і рухливі роботи бувають підлоговими, підвісними (переміщаються по монорельсу), що вбудовуються в інше обладнання (в верстат або ін.);
- 7) по виконанню робота - залежить від призначення (нормальний, пилозахисний, теплозахисний, вологозахисний, вибухобезпечний і т.д.).

За способом управління:

- 1) з програмним управлінням;
- 2) з адаптивним керуванням;
- 3) з інтелектуальним керуванням.

За швидкістю рухів:

- 1) мала швидкість - до 0,5 м / с;
- 2) середня - лінійні швидкості від 0,5 до 1 м / с (~ 80% робіт);
- 3) висока - понад 1 м / с (~ 20% робіт).

За точністю рухів:

- 1) мала точність - при лінійній похибці від 1 мм і вище;
- 2) середня - від 0,1 до 1 мм (найбільше робіт);
- 3) висока - менше 0,1 мм.

Параметри, що визначають технічний рівень робіт:

- 1) надійність;
- 2) число одночасно працюючих ступенів рухливості;
- 3) час програмування;
- 4) питома вантажопідйомність (віднесена до маси робота);
- 5) вихідна потужність маніпулятора, віднесена до потужності його приводів;
- 6) відносні оцінки габаритних параметрів і т.п.

Ці параметри служать критеріями якості, призначені для їх оптимізації при проектуванні і порівняльній оцінці робіт [4].

1.3 Системи управління маніпулятором

Системами управління оснащені всі маніпулятори, у яких переміщення рухомих ланок здійснюються за допомогою різних немеханічних приводів.

Система управління сучасного маніпулятора складається з декількох підсистем, що виконують певні інформаційні, керуючі, захисно-попереджувальні, обмежувальні та інші функції.

Розрізняють три основних види управління: циклове, позиційне, контурне. Циклове управління програмує послідовність виконання рухів і умови початку і

закінчення рухів; становище, до якого йде рух, задаються на самому маніпуляторі, а не в програмі; швидкість переміщення визначається характеристиками приводу і також не задається в програмі. При позиційному управлінні команди подаються так, що переміщення робочого органу походить від точки до точки, причому положення точок задаються програмою. Швидкість переміщення між точками не контролюється і не реалізується. При контурному управлінні рух робочого органу відбувається по заданій траєкторії і задається швидкістю. У програмі задаються самі траєкторії і режими руху. Контурне управління використовується в технологічних роботах.

Пристрій управління та інші блоки системи управління при цикловому, позиційному і контурному управліннях можуть бути реалізовані на однакових або різних принципах і елементних базах. В особливий вид зазвичай виділяється адаптивне управління, при якому здійснюється автоматична зміна керуючих програм. Зокрема адаптація або пристосованість системи управління може полягати в тому, що пристрої системи управління за допомогою спеціальних датчиків визначають конфігурацію об'єкта і його положення.

Об'єктом управління є виконавчий пристрій (маніпулятор плюс пристрій пересування, якщо він є). У виконавчий пристрій також входять приводи. Все інше обладнання робота призначене для формування і видачі керуючих впливів виконавчому пристрою. Таким чином, пристрій управління отримує сигнали (від датчиків) і видає сигнали (на приводи маніпулятора).

Для пульта ручного керування основними є зв'язки з пристроєм управління. З пульта ручного керування можуть здійснюватися введення програм, настройка. На пульт управління надходять сигнали про виконання різних рухів, а також про можливі порушення режимів роботи та про відмови. Слід мати на увазі, що в пристрій управління зазвичай надходять сигнали від зовнішніх (по відношенню до робота) датчиків і систем (наприклад, від систем управління устаткуванням, що обслуговується). Пристрій управління роботом також може бути пов'язаний з ЕОМ, яка координує роботу декількох одиниць обладнання, наприклад всього обладнання технологічного ділянки або лінії. У цих випадках ця ЕОМ як би знаходиться на більш

високому поверсі, на наступному рівні управління. Така багаторівнева система управління типова для сучасних гнучких виробничих систем [5].

1.4 Способи моделювання маніпуляторів

Моделювання відіграє ключову роль в області роботобудуванні, тому що воно дозволяє проводити експерименти, які в іншому випадку були б дорогими і / або вимагали великих витрат часу [6].

За допомогою комп'ютерної динамічної моделі робота-маніпулятора можна визначити діапазон кутів поворотів ланок і робочу зону робота з урахуванням обмежень його конструкції, а також визначити різні моменти і сили, які виникають в вузлах конструкції. Розробка моделі робота відіграє ключову роль при його проектуванні.

Існують різні підходи до розробки динамічної моделі робота-маніпулятора. Є математичні і комп'ютерні динамічні моделі.

Математична динамічна модель маніпулятора може бути побудована на основі відомих законів ньютонівської або лагранжевої механіки. Результатом застосування цих законів є рівняння, що зв'язують діючі в зчленуваннях сили і моменти з кінематичними характеристиками і параметрами руху ланок. Таким чином, рівняння динаміки руху реального маніпулятора можуть бути отримані традиційними методами Лагранжа-Ейлера або Ньютона-Ейлера.

Виведення рівнянь динаміки руху маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера відрізняється простотою і єдністю підходу і засноване на наступному:

1. На описі взаємного просторового розташування систем координат i -го і $(i-1)$ -го ланок за допомогою матриці перетворення однорідних координат.
2. На використанні рівняння Лагранжа-Ейлера

З метою отримання більш ефективних з обчислювальної точки зору алгоритмів розрахунку узагальнених сил і моментів використовуються рівняння Ньютона-Ейлера. Висновок рівнянь Ньютона-Ейлера простий за змістом, але вельми трудомісткий. Результатом є система прямих і зворотних рекурентних рівнянь, послідовно застосовуваних до ланок маніпулятора.

Рівняння Лагранжа-Ейлера мають низьку обчислювальну ефективність, це обумовлено тим, що для опису кінематичного ланцюга використовуються матриці перетворення однорідних координат. Рівняння Ньютона-Ейлера володіють більшою обчислювальною ефективністю, що пов'язане з їх векторіальним поданням і їх рекуррентною природою [7].

Для побудови комп'ютерної динамічної моделі робота використовуються програми призначені для моделювання динаміки і кінематики просторових механічних систем, наприклад: MSC.ADAMS; AutoCad; Unigraphics NX; CATIA; SolidWorks, Компас.

Створення моделі має на увазі опис всіх її характеристик: геометричних розмірів, фізичних властивостей, способів з'єднання рухомих і нерухомих частин, завдання діючих сил і моментів, початкового положення елементів моделі і їх швидкостей. Етап тестування моделі включає в себе моделювання поведінки частин моделі під дією прикладених сил і заданих рухів і виявлення критичних параметрів, найбільш сильно впливають на ефективність роботи моделі в цілому.

1.5 CAD-системи

Система автоматизованого проектування (САПР) - складний комплекс засобів, призначений для автоматизації проектування [8].

Створювалася після закінчення Другої світової війни науково-дослідними організаціями ВПК США для застосування в апаратно-програмному комплексі управління силами і засобами континентальної протиповітряної оборони, - перша така система була створена американцями в 1947 р. Перша радянська система автоматизованого проектування була розроблена в кінці 1980-х рр. робочою групою Челябінського політехнічного інституту, під керівництвом професора Кошина А. А. [9].

Згідно з прийнятими в 1980-х роках стандартам, САПР - це інформаційний комплекс, що складається з апаратного забезпечення (комп'ютера), програмного забезпечення, описи способів і методів роботи з системою, правил зберігання даних і багато чого іншого [8].

Використання САПР в проектуванні електронних систем відомо як автоматизація електронного проектування (англ. EDA). У механічному проектуванні САПР відомий як механічна автоматизація проектування (англ. MDA) або автоматизоване складання креслень (англ. CAD), який включає процес створення технічного креслення з використанням комп'ютерного програмного забезпечення [9].

Сучасні пакети програмного забезпечення для автоматизованого проектування варіюються від 2D-векторних систем креслення до 3D-моделей твердого тіла і поверхні. CAD пакети також часто допускають обертання в трьох вимірах, дозволяючи переглядати проєктований об'єкт під будь-яким бажаним кутом, навіть зсередини назовні. Деякі програми CAD здатні до динамічного математичного моделювання. Технологія CAD використовується при проектуванні інструментів і механізмів, а також при проектуванні всіх типів будівель, від невеликих житлових будинків до найбільших комерційних і промислових споруд [9].

1.5.1 AutoCAD

AutoCAD - це базова САПР, що розробляється і поставляється компанією Autodesk. AutoCAD - найпоширеніша CAD-система в світі, що дозволяє проєктувати як в двовимірному, так і тривимірному середовищі. За допомогою AutoCAD можна будувати 3D-моделі, створювати і оформляти креслення і багато іншого [8].

Комплексний підхід розробників до вирішення завдань дозволяє використовувати ПО в ряді галузей:

- архітектурне моделювання;
- будівництво;
- електротехніка;
- машинобудування.

Дистрибутив переведений на 18 мов. Завдяки цьому не виникає питання, як зробити креслення в AutoCAD при реалізації міжнародних проєктів. Глибина опрацювання інтерфейсу в окремих версіях може бути різною [10].

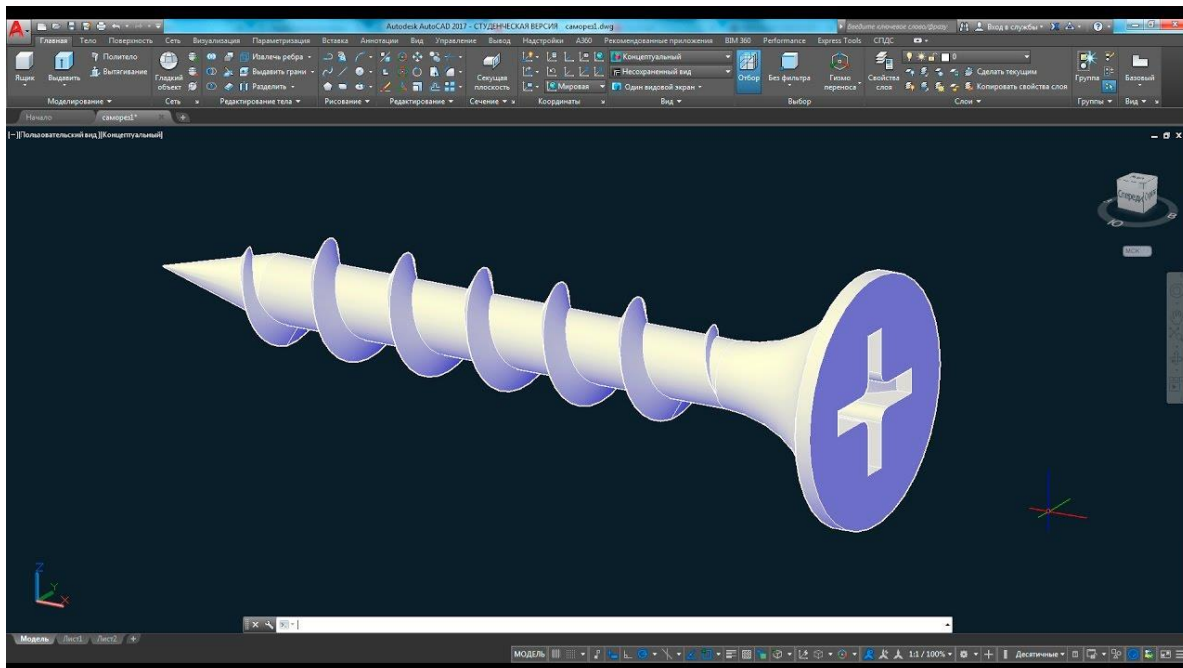


Рисунок 1.8. 3D-моделювання і візуалізація шурупа в середовищі AutoCAD

Можливості програмного комплексу AutoCAD

Незважаючи на розвиток технологій і постійні удосконалення, плоскі зображення займають лівову частку обсягу праці проєктувальників. Щоб спростити і прискорити розробку документації, були впроваджені такі інструменти:

Інтелектуальне нанесення розмірів. Довжина об'єкта підсвічується при наведенні на нього курсора. Завдяки цьому можна вносити коригування до чистового оформлення.

Видові екрани. Взаємодіючи з великими моделями, ви можете виводити на передній план окремі області креслення.

Зв'язування відомостей. Немає необхідності окремо вносити коригування в суміжні таблиці. При інтегруванні дані будуть підтягуватися автоматично.

Експорт з Microsoft Excel. З'явилася можливість використовувати формули для обчислень, дані з яких можна зводити в специфікації.

Автоматизація та візуалізація окремих операцій зводять до мінімуму помилки і неточності. Зростає швидкість розробки проєктно-кошторисної документації.

Продукти Autodesk значно вдосконалилися з моменту появи на ринку. З їх допомогою можна отримати як примітивні об'ємні тіла, виконані в два кліка методом видавлювання контуру, так і повноцінні складні об'єкти. Вони будуються по хмарах

точок. Залежно від необхідної деталізації використовується різна їх кількість. Завдяки оновленню інтерфейсу, процес роботи став простим і зручним.

Система може експортувати інформацію з 3D принтерів. Після затвердження прототипу, сумісний файл розкладається інженерами на креслення.

В останніх версіях творцям вдалося істотно збільшити продуктивність і знизити вимоги до ресурсів комп'ютера для обробки моделі. Вони домоглися цього шляхом кешування тільки тієї області, з якої ведеться взаємодія. Немає необхідності завантажувати в пам'ять весь макет [10].

1.5.2 Bricscad

В даний час на ринку з'явився цілий ряд систем, які позиціонуються, як альтернатива AutoCAD. Серед них можна окремо відзначити Bricscad від бельгійської компанії Bricsys, яка дуже активно розвивається, підтримує безпосередньо формат DWG і має цілий ряд відмінностей, включаючи інструменти прямого варіаційного моделювання, підтримку BIM-технологій [8].

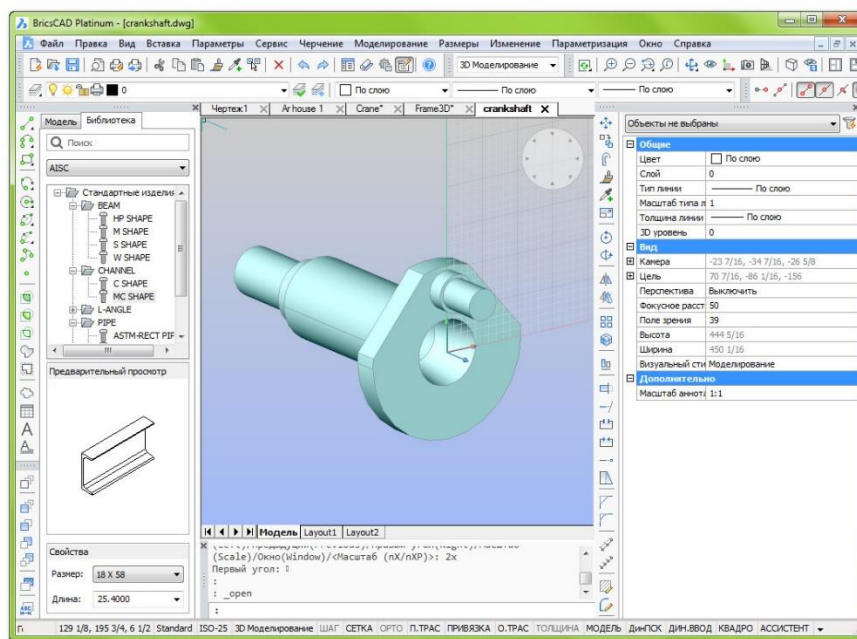


Рисунок 1.9. 3D моделювання в середовищі BricsCAD

Програма випускається на 18 мовах і доступна для операційних систем Windows, Linux і MacOS. Для BricsCAD існує більше 400 додаків, що дозволяють використовувати його в архітектурі, будівництві, машинобудуванні, проектуванні інженерних мережах, електриці, автоматичі, та інших сферах проектування [11].

BricsCAD підтримує двовимірне параметричне креслення за допомогою геометричних і розмірних обмежень, повністю сумісний з форматом файлів і команд з AutoCAD.

В області тривимірного моделювання BricsCAD істотно перевершує можливості AutoCAD, пропонуючи користувачам:

- зручні операції прямого редагування геометрії (переміщення / обертання граней, тягни-штовхай);
- тривимірні геометричні і розмірні обмеження;
- автоматичне розпізнавання конструктивної концепції імпортованої геометрії
- ієрархічна організація DWG-файлів з тривимірною геометрією в збірки методами спадного і вихідного проектування
- асоціативна відомість матеріалів (BOM)
- аналіз (в реальному часі) прямої і інверсної кінематики механізмів
- проектування виробів з листового металу

Додатковий модуль BricsCAD BIM реалізує концепцію інформаційного моделювання будівель в середовищі .dwg.

Всі створені в BricsCAD файли повністю сумісні з AutoCAD [13].

Зібрані в BricsCAD переваги дозволяють позиціонувати дану САПР, як універсальний інструмент проектувальника, який вирішує основні завдання проектування в єдиному середовищі без додаткових фінансових і тимчасових витрат. А високий рівень сумісності BricsCAD з іншими DWG САПР дозволяє підприємствам брати участь в розробці найбільших проектів спільно з іншими проектними організаціями [12].

1.5.3 SolidWorks

SolidWorks - програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення. Система SolidWorks стала першою САПР, що підтримує твердотільне моделювання для платформи Windows [14].

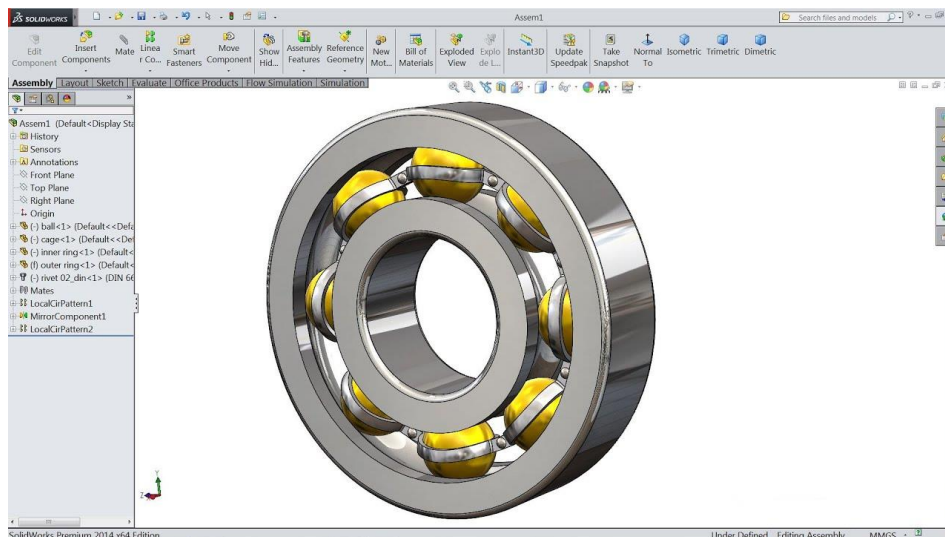


Рисунок 1.10. 3D моделювання в середовищі SolidWorks

Можливості SolidWorks

Нижче ми перерахуємо базовий функціонал програми, доступний без установки розширень. Розробники також подбали про створення додаткових модулів, що значно збільшує можливості програми. Отже, ось що пропонує SolidWorks [15]:

- твердотільне 3D моделювання;
- розробку зварних конструкцій;
- розрахунки на міцність;
- прорахунок гідро / аеродинаміки;
- можливість створення креслень;
- проектування з урахуванням матеріалу виробу;
- візуалізацію;
- прорахунок на вигин;
- роботу з даними 3D сканування (функція ScanTo3D);
- можливість проектування виробів з листового металу;
- роботу з електричними схемами;
- можливість анімації готового виробу;
- експорт даних в різні формати.

1.5.4 Компас-3D

Система «Компас-3D» призначена для створення тривимірних асоціативних моделей окремих деталей і складальних одиниць, що містять як оригінальні, так і

стандартизовані конструктивні елементи. Параметрична технологія дозволяє швидко одержувати моделі типових виробів на основі проектного раніше прототипу. Численні сервісні функції полегшують рішення допоміжних завдань проектування і обслуговування виробництва.

Система «Компас-3D» включає наступні компоненти: система тривимірного твердотільного моделювання, універсальна система автоматизованого проектування «Компас-Графік» і модуль формування специфікацій. Ключовою особливістю «Компас-3D» є використання власного математичного ядра і параметричних технологій [16].

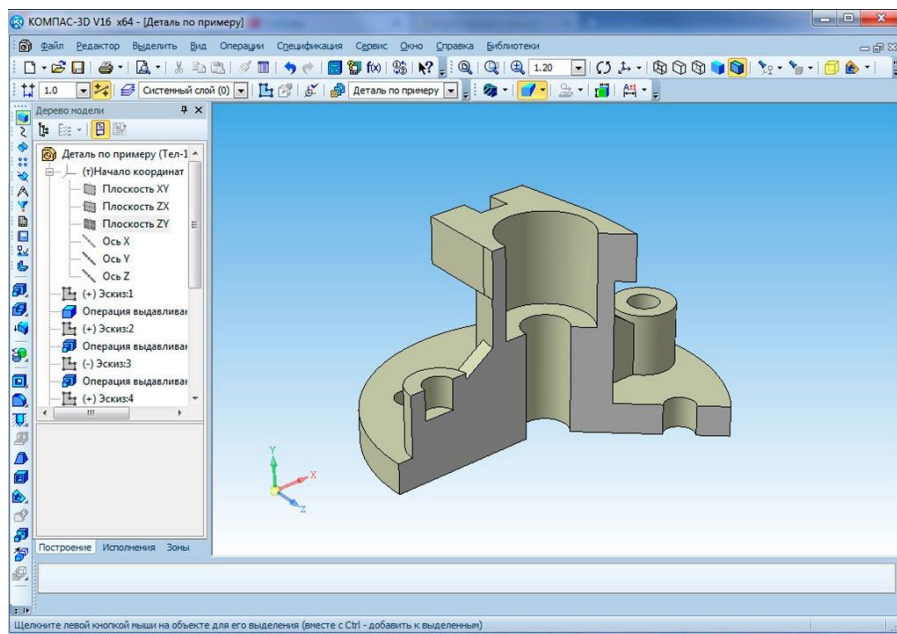


Рисунок 1.11. 3D моделювання в середовищі Компас-3D

Основні функції

Твердотільне і параметричне 3D моделювання. 3D модель будується на основі ескізів, до яких застосовуються стандартні операції. Також є можливість включення прив'язок і рівнянь;

Наявність стандартних бібліотек моделей. У додатку є вбудований каталог готових моделей. В основному це поширені технічні деталі;

Побудова креслень і складання технічної документації. Спочатку Компас-3D був орієнтований саме на 2D проектування, тому алгоритм розробки креслень в ньому реалізований на вищому рівні;

Можливість проектування виробів з листового матеріалу. Дуже корисна функція, грамотно реалізована в програмі. Враховано проектування безлічі елементів, включаючи згини, отвори, вирізи, штампування і т.д.;

Облік допусків. Компас-3D - це комплексний додаток для проектування, в якому при створенні моделі є можливість врахувати допуски, посадку, властивості матеріалу і навіть технологію виробництва кінцевого виробу;

Величезна кількість інструментів. Розробниками передбачено безліч корисних функцій і інструментів, які максимально полегшують 3D моделювання.

Особливості програми

Власне ядро. Програма побудована на власному, унікальному ядрі, максимально підтримує функції програми;

Інтеграція з іншими програмами. Все, що створене в Компасі, є можливість перенести в інші САПР і без проблем працювати з вихідними даними;

Підтримка різних файлових форматів. У вас не виникне проблем з експортом або імпортом створених виробів: програма підтримує найбільш популярні формати файлів;

Можливість проектування трубопроводів, кабелів і кабельних систем. Завдяки САПР більшу частину роботи можна виконати автоматично, без значних зусиль. Ця можливість значно спрощує проектування на різних підприємствах;

Вбудований модуль для створення електричних ланцюгів [17].

1.5.5 CATIA

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) - САПР французької фірми Dassault Systemes.

Це комплексна система автоматизованого проектування (CAD), технологічної підготовки виробництва (CAM) та інженерного аналізу (CAE), що включає в себе передовий інструментарій тривимірного моделювання,

підсистеми програмної імітації складних технологічних процесів, розвинені засоби аналізу і єдину базу даних текстової та графічної інформації.

Система дозволяє ефективно вирішувати всі завдання технічної підготовки виробництва - від зовнішнього (концептуального) проектування до випуску креслень,

специфікацій, монтажних схем і керуючих програм для верстатів з числовим програмним управлінням [18].

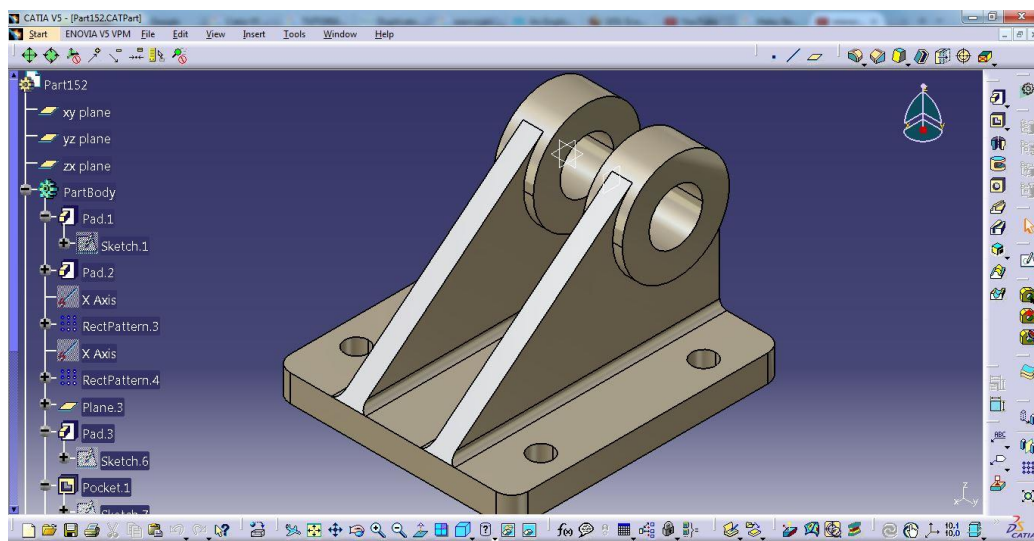


Рисунок 1.12. 3D моделювання в середовищі CATIA

Лінійка програмних продуктів CATIA відповідає потребам семи основних галузей промисловості (аерокосмічна, автомобільна, суднобудівна, машинобудування, електроніка, будівництво заводів і товари широкого вжитку).

Портфель продуктів CATIA в даний час включає більше 300 функціональних модулів, які можуть бути класифіковані і згруповані за такими параметрами:

- платформи;
- області застосовності (домени);
- конфігурації;
- окремі продукти.

Платформами є деякі підмножини продуктів, які дозволяють вирішувати одні й ті ж завдання розробників на різному рівні функціональності, продуктивності і, відповідно, з різним рівнем витрат. Визначено три платформи: P1, P2 і P3.

Платформа P1 являє собою набір модулів класичної «середньої» CAD / CAM-системи, яка, однак, є частиною єдиного PLM (Products Lifecycle Management)-середовища і в будь-який час може бути доповнена продуктами інших платформ з метою підвищення продуктивності і функціональності рішень. У поєднанні з PDM (Product Data Management)-системою ENOVIA-SmarTeam, продукти CATIA на основі платформи P1 можуть бути рекомендовані як відносно дешеві PLM-рішення для

малих і середніх підприємств, або як рішення початкового рівня для великих підприємств, яке в міру розвитку промислового бізнесу може бути легко трансформовано на більш високий рівень

Платформа P2 - це високорозвинена «важка» CAD / CAM / CAE-система класу high-end, що забезпечує всю повноту функціональності для продуктивної колективної розробки виробів різної складності з використанням механізмів накопичення знань і управління цифровим макетом виробу.

Платформа P3 включає спеціалізовані модулі найвищої продуктивності для цільового використання в різних галузях промисловості.

Наявність різних платформ в CATIA є унікальним засобом для розширення її користувальницької бази за принципом «одна система - різні можливості» і для швидкого нарощування продуктивності.

Області застосування (домени) - об'єднують у собі програмні продукти, характерні для вирішення конкретної сукупності завдань у процесі життєвого циклу виробу. Виділяються наступні сім областей застосування [19]:

- машинобудівне проектування (Mechanical Design);
- розробка дизайну виробів (Shape Design and Styling);
- системний синтез промислових виробів (Product Synthesis);
- проектування систем і комунікацій (Equipment and Systems Engineering);
- інженерний аналіз (Analysis);
- програмування обробки на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ) (NC Manufacturing);
- управління проектуванням і обмін даними (Infrastructure).

1.5.6 Siemens NX

NX (раніше «Unigraphics») - флагманська CAD / CAM / CAE-система виробництва компанії Siemens PLM Software (до 1 жовтня 2007 року вона називалася UGS). Програма використовує ядро геометричного моделювання Parasolid.

NX підтримує широкий спектр операційних систем, включаючи UNIX і Linux, Mac OS X, Windows з можливістю одночасного використання декількох ОС.

Набір додатків, що входить в пакет NX CAD, дозволяє вирішувати завдання розробки повного електронного макета всього виробу і його складових частин для подальшого використання в процесах технологічної підготовки виробництва.

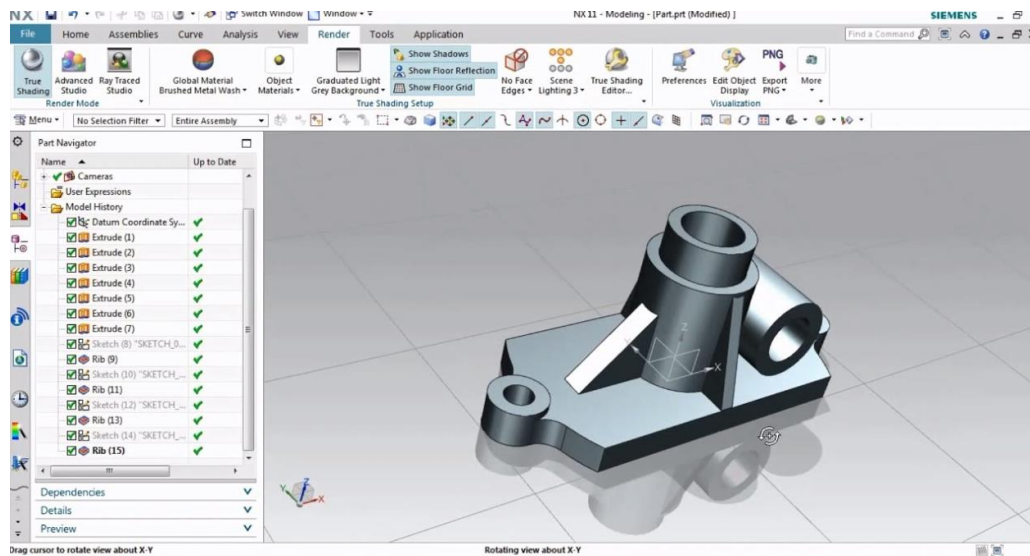


Рисунок 1.13. 3D моделювання в середовищі Siemens NX Cad

Функціональність додатків дозволяє автоматизувати етапи проектування виробу та випуску конструкторської документації в різній формі подання. Підтримуються технології проектування як «знизу-вгору», так і «зверху-вниз» з можливістю побудови наскрізних процесів розробки від вимог до виробу до етапу видачі даних для виробництва.

Промисловий дизайн

Засоби промислового дизайну в NX призначені для розробки зовнішнього вигляду (або інтер'єру) проектованого виробу та аналізу його естетичних і візуальних характеристик. Дана функціональність дозволяє автоматизувати процеси розробки дизайну від оцифровки або створення двовимірних скетчів до аналізу технологічних процесів виготовлення елементів зовнішнього вигляду і проектування відповідної оснастки.

Засоби автоматизації розробки дизайну представлені такими групами інструментів:

Моделювання поверхонь (Freeform Shape) - інструментарій для створення параметричних поверхонь будь-якого ступеня складності, а також набір засобів аналізу якості геометрії.

Вільне моделювання (Realize Shape) - інструментарій, що дозволяє створювати точну геометрію, використовуючи алгоритм поверхонь підрозділу (subdivision), при якому користувач модифікує геометрію шляхом перетягування керуючих точок-маркерів.

Динамічний рендеринг (Dynamic & Photorealistic Rendering) - набір механізмів, що дозволяють отримувати реалістичне зображення виробу як в режимі реального часу, так і в послідовному режимі. У режимі реального часу система автоматично оновлює і регенерує отримуються зображення за будь-зміни геометрії. При генерації зображення враховуються джерела світла, матеріали, текстури, параметри навколишнього середовища, накладення тіней і інші параметри, що впливають на якісні характеристики одержуваного зображення.

Розробка механічних систем

Система NX CAD дозволяє виконати моделювання деталей і зборок виробу, провести аналіз перетинів і розрахунок маси, підготувати 2D-документацію - креслення або 3D-документацію з використанням PMI (розміри і анотації наносяться на 3D-модель).

Можливості системи дозволяють моделювати вироби будь-якого ступеня складності і розмірності - від побутової техніки до виробів корабельної і авіакосмічної промисловості.

Розробка систем маршрутизації

В системі NX CAD представлено кілька додатків закриваючих завдання проектування електричних і трубопровідних систем різного призначення. Функціональність даних додатків дозволяє моделювати системи з урахуванням фізичних обмежень (провисання, радіуси згину, прямі ділянки і т.д.), а також підбирати компоненти системи по одному або декільком критеріям. У NX доступні наступні програми:

"Проектування електрики" - містить повний набір інструментів для створення електричного опису розроблюваного виробу, аналізу технологічності і підготовки необхідних даних і документації для виробництва.

"Проектування трубопроводів" - включає інструменти для проектування гідравлічних, пневматичних, паливних та інших трубопровідних систем, що складаються з жорстких компонентів.

"Логічна маршрутизація" - дозволяє розробляти схемний опис виробів для трубопровідних систем і пов'язувати його з 3D макетом для забезпечення трасування і контролю відповідності прокладених трас схемою [23].

1.5.7 PTC Creo

Creo - це сімейство або набір програм для автоматизованого проектування (CAD), що підтримують дизайн продукту для дискретних виробників і розробляється PTC. Набір складається з додатків, кожен з яких надає певний набір можливостей для ролі користувача в розробці продукту.

Creo працює на Microsoft Windows і надає додатки для 3D CAD параметричних функцій твердого моделювання, 3D прямого моделювання, 2D ортографічних поглядів, кінцевих елементів аналізу та моделювання, схематичного дизайну, технічних ілюстрацій, перегляду та візуалізації [24].

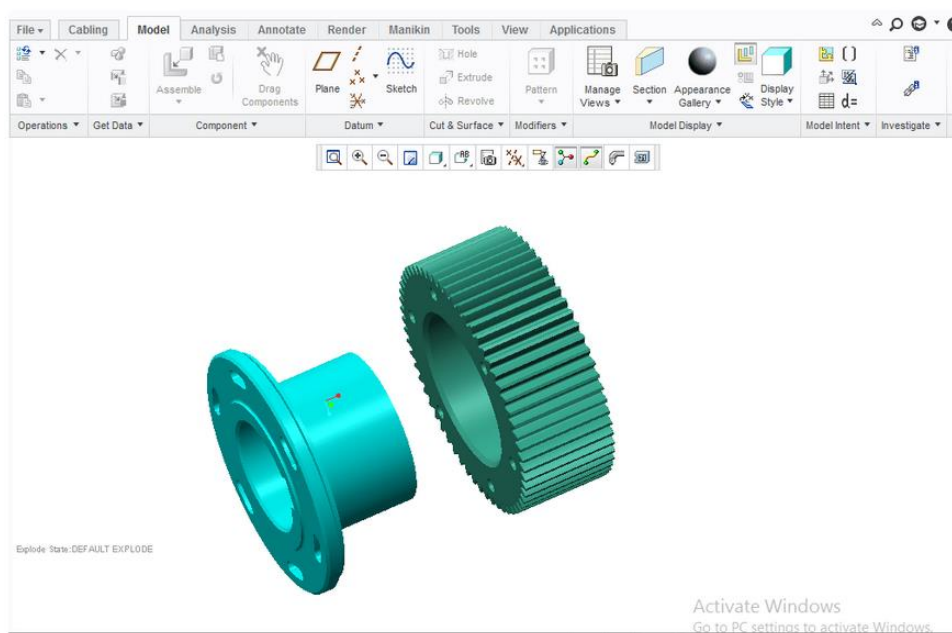


Рисунок 1.14. 3D моделювання в середовищі PTC Creo

Розробники в компанії PTC створили додаток Creo Parametric в якості надійного базового програмного забезпечення, яке дозволяє користувачам розширювати функціональність за допомогою кожного компонента. У міру зростання складності виробів в проектуванні, система Creo пропонує розширені можливості виконання

вимог. Кожен виріб створюється по-різному, і ваше рішення 3D CAD також має бути унікальним.

Можливості Creo:

- Моделювання та конструювання;
- 3D-проектування;
- Параметрична і довільна побудова поверхонь;
- 2D-креслення;
- Модельно-орієнтоване проектування;
- Проектування листових деталей;
- Розробка механізмів;
- Проектування деталей з пластмаси;
- Проектування рамних конструкцій і зварних з'єднань;
- Проектування ергономічних факторів;
- Інтелектуальне конструювання з використанням мережевих можливостей;
- Концептуальне конструювання;
- Промисловий дизайн;
- Інженерний аналіз;
- Тепловий аналіз;
- Аналіз руху;
- Аналіз заповнення прес-форм;
- Аналіз витоків і зазорів;
- Доповнена реальність;
- Середовища з декількома системами CAD;
- Візуалізація і 3D-анімація;
- Управління даними про вироби;
- Управління збірками та підвищення продуктивності;
- Конструювання інструментів і матриць;
- Виробнича механічна обробка [26].

Основні переваги PTC Creo Parametric:

- Підвищення продуктивності при більш ефективних і гнучких можливостях 3D-проектування;
- Просте і швидке створення 3D-моделей будь-якої деталі і складання;
- Спеціальний набір інструментів для роботи з великим збірками;
- Автоматичне створення виробничих креслень, при повній впевненості в тому, що вони завжди відображають поточний виріб;
- Підвищення привабливості зовнішнього вигляду за допомогою можливостей по створенню поверхонь;
- Миттєвий доступ до бібліотеки деталей, включаючи гвинти, болти, гайки і шайби;
- Отримання миттєвого доступу до комплексних навчальних матеріалів і інструкцій з продукту [25].

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Кінематика руху маніпулятора

Предметом кінематики маніпулятора є аналітичний опис геометрії руху маніпулятора щодо деякої заданої абсолютної системи координат без урахування сил і моментів, що породжують цей рух.

Таким чином, завданням кінематики є аналітичний опис просторового розташування маніпулятора в залежності від часу і, зокрема, встановлення зв'язку між значеннями приєднаних координат маніпулятора і положенням і орієнтацією його схвата в декартовому просторі.

Механічний маніпулятор можна розглядати як розімкнутий ланцюг, який складається з декількох твердих ланок, послідовно з'єднаних обертовими або поступальними зчленуваннями, що приводяться в рух силовими приводами [20].

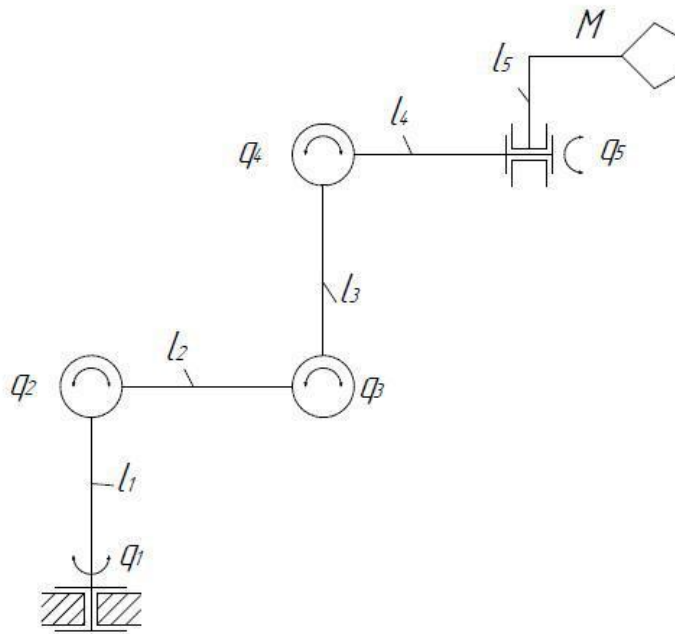


Рисунок 2.1. Кінематична схема маніпулятора

В робототехніці, є дві основні задачі кінематики: пряма і зворотня. Пряма задача - це обчислення координат (X, Y, Z) робочого органу маніпулятора по його кінематичній схемі і заданій орієнтації ($A_1, A_2 \dots A_n$) його ланок (n - число ступенів свободи маніпулятора, A - кути повороту).

Зворотна задача - це обчислення кутів ($A_1, A_2 \dots A_n$) по заданому положенню (X, Y, Z) робочого органу і знову ж відомою схемою його кінематики [21].

2.1.1 Пряма задача кінематики, параметри Денавіта-Хартенберга

Для систематичного і узагальненого підходу до опису та поданням розташування ланок маніпулятора (виконавчих механізмів робота) щодо заданої абсолютної системи координат застосовують матричну і векторну алгебру.

Ланки маніпулятора можуть здійснювати обертальний і / або поступальний рух щодо абсолютної системи координат, осі якої паралельні осям зчленувань ланок. Пряма задача кінематики зводиться до визначення матриці перетворення, що встановлює зв'язок між абсолютною і пов'язаної системами координат [22].

Управління маніпулятором є переміщення захоплення в певну точку з певною орієнтацією. Це переміщення здійснюється за рахунок вказівки узагальнених координат.

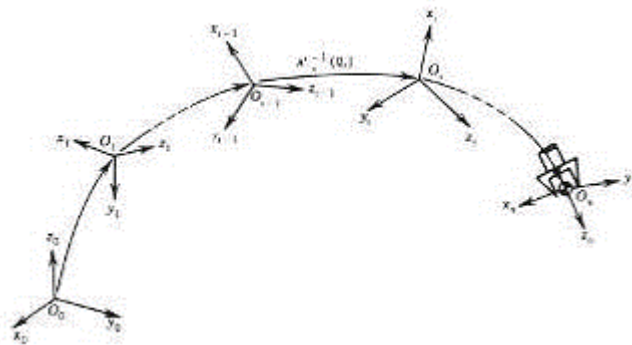


Рисунок 2.2. Система локальних координат робота-маніпулятора.

Узагальненими координатами є вимірювані кутові переміщення між двома сусідніми ланками робота. З кожною ланкою робота пов'язана локальна декартова система координат. Початок систем координат поєднане з кожної ступенем рухливості маніпулятора.

Кожна система координат формується на основі трьох правил:

1. Вісь z_{i-1} спрямована уздовж осі i -го зчленування.
2. Вісь x_i перпендикулярна осі z_{i-1} і спрямована від неї.
3. Вісь y_i доповнює осі x_i, z_i до правої декартової системи координат [30].

Системи координат нумеруються в порядку зростання від заснування до схвату маніпулятора. Взаємне розташування сусідніх ланок описується однорідною

матрицею перетворення розмірністю 4×4 , яка описує положення системи координат кожної ланки щодо системи координат попередньої [31].

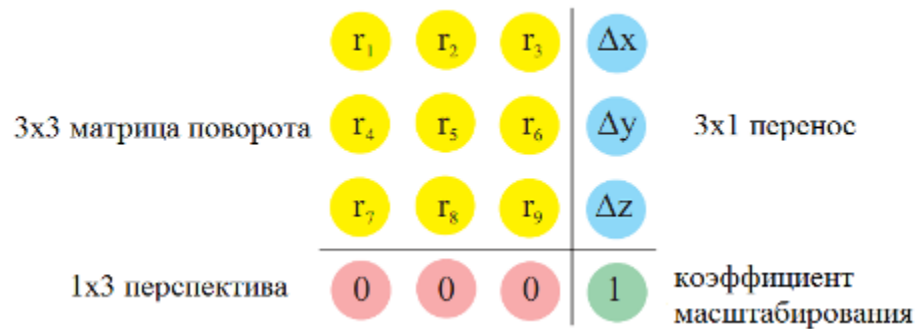


Рисунок 2.3. Однорідна матриця перетворення

Матриця перетворення ставиться у відповідність кожній локальній системі координат (крім найпершої, що біля стійки) і несе подвійний сенс: по-перше вона описує положення і орієнтацію локальної системи координат (i -й) щодо попередньої локальної системи координат ($i-1$, якщо нумерувати, починаючи зі стійки), а по-друге є засобом перетворення i -й координатної системи в $i-1$ -у, тобто координати вектора, в i -й системі координат можуть бути представлені в $i-1$ -й шляхом множення координат цього вектора на i -у матрицю перетворення (A матрицю). Матриця A складається з чотирьох частин: 3×3 матриця, яка визначає з одного боку орієнтацію відповідної локальної системи координат щодо попередньої за допомогою кутів Ейлера і з іншого боку є матрицею повороту, 3×1 вектор з одного боку є координатою i -й локальної системи щодо $i-1$ -й і з іншого боку вектор переносу, останні дві частини - рядок 1×3 визначає перспективу і один елемент, є коефіцієнтом масштабування.

Матриці перетворення для локальної системи координат вираховуються виходячи з геометричних особливостей ланок. Подання Денавіта-Хартенберга твердих ланок залежить від чотирьох геометричних параметрів, відповідних кожній ланці. Ці чотири параметри повністю описують будь-який обертальний або поступальний рух. Цей набір параметрів достатній для опису кінематичної схеми кожної ланки.

α_i - приєднаний кут (узагальнена координата) - кут, на який треба повернути вісь x_{i-1} навколо осі z_{i-1} , щоб вона стала зі спрямована з віссю x_i (знак визначається відповідно до правила правої руки).

d_i - відстань між перетином осі z_{i-1} з віссю x_i і початком ($i-1$ -й системи координат, що відраховується вздовж осі z_{i-1}).

a_i - лінійний зсув - відстань між перетином осі z_{i-1} з віссю x_i і початком i -й системи координат, що відраховується вздовж осі x_i , тобто найкоротша відстань між осями z_{i-1} і z_i .

Θ_i - кутовий зсув - кут, на який треба повернути вісь z_{i-1} навколо осі x_i , щоб вона стала зі спрямованої з віссю z_i (знак визначається відповідно до правила правої руки) [30].

2.1.2 Зворотна задача кінематики

Зворотна задача кінематики, як і пряма задача про положення, є однією з основних задач кінематичного аналізу та синтезу маніпуляторів. Управління маніпуляційними роботами, як правило, здійснюється в просторі узагальнених координат, а координати об'єктів маніпулювання задаються в деякій базовій системі. Таким чином, для управління становищем і орієнтацією робота виникає необхідність отримання рішення оберненої задачі.

Зворотня задача кінематики про положення складається у визначенні узагальнених координат маніпулятора:

$$r_j (j = \overline{1, m}), m \leq 6$$

за заданими в опорній системі координат вихідної ланки - схвата робота:

$$q_i (i = \overline{1, n})$$

де n - число ступенів свободи.

Для розв'язання оберненої задачі необхідною умовою є $n=m$, що означає, що в цьому випадку можна скласти n незалежних рівнянь, число невідомих в якому також рівно n .

При вирішенні оберненої задачі кінематики може виникнути кінематична невизначеність, коли для одного і того ж положення схвата може існувати дві або більше конфігурацій маніпулятора, т. Е. Для одного набору r_j може існувати кілька наборів q_i і в результаті завдання вирішується неоднозначно.

2.2 Розрахунок інерційних характеристик ланок

До інерційних характеристик ланки відносяться його маса m , положення центру мас ланки, а також осьові J_x, J_y, J_z і відцентрові J_{xy}, J_{yz}, J_{zx} моменти інерції щодо осей x, y, z , що проходять через задану точку ланки і утворюють тензор інерції ланки в цій точці.

Перехід до моделі робота з чотирма степенями

Вважаючи $q_5 \equiv 0$, зображуємо кінематичну модель маніпулятора з чотирма функціонуючими ступенями рухливості. У цій моделі четверта ланка складається з жорстко скріплених між собою четвертої і п'ятої ланок вихідної моделі.

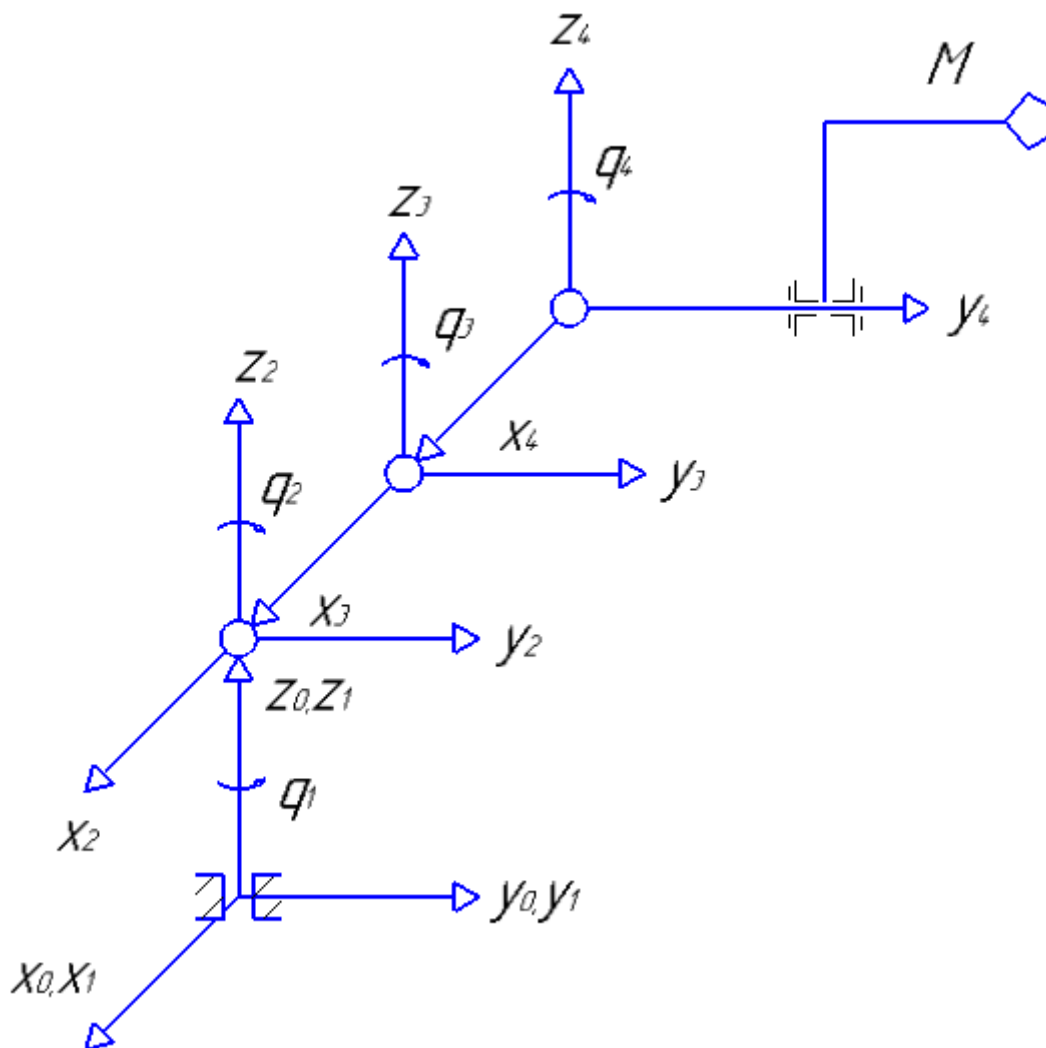


Рисунок 2.4. Кінематична модель маніпулятора

Вихідні дані

Геометричні розміри ланок залишаються без змін:

$l_1 = 0,038$ м, $l_2 = 0,126$ м, $l_3 = 0,125$ м, $l_4 = 0,067$ м, $l_{5y} = 0,055$ м, $l_{5z} = 0,052$ м.

Від значень мас ланок у вихідній моделі

$m^{\circ}_1 = 0,117$ кг, $m^{\circ}_2 = 0,036$ кг, $m^{\circ}_3 = 0,092$ кг, $m^{\circ}_4 = 0,136$ кг, $m^{\circ}_5 = 0,071$ кг переходимо до мас ланок в досліджуваний моделі
 $m_1 = m^{\circ}_1 = 0,117$ кг, $m_2 = m^{\circ}_2 = 0,036$ кг, $m_3 = m^{\circ}_3 = 0,092$ кг, $m_4 = m^{\circ}_4 = 0,136$ кг, $m_5 = m^{\circ}_5 = 0,071$ кг.

Визначення положення центрів мас ланок C1, C2, C3, C4 в локальних системах координат

Ланки вважаємо тонкими однорідними стержнями. Зображуємо кожну ланку разом зі скріпленою з нею локальною системою осей.

Перша ланка (рис. 2.5) $l_1 = 0,038$ м; $m_1 = 0,117$ кг.

Знаходимо вектор координат центру мас ланки C1 в локальній системі осей $O_1x_1y_1z_1$: $r_{c_1}^{(1)} = (0,0014; 0,081; -0,006)^T$

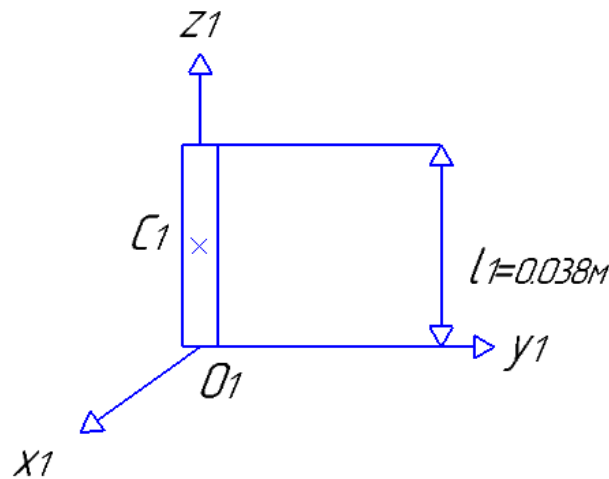


Рисунок 2.5 Перша ланка

Друга ланка (рис. 2.6) $l_2 = 0,126$ м; $m_2 = 0,036$ кг.

Знаходимо вектор координат центру мас ланки C2 в локальній системі осей $O_2x_2y_2z_2$: $r_{c_2}^{(2)} = (0,001; 0,14; -0,002)^T$.

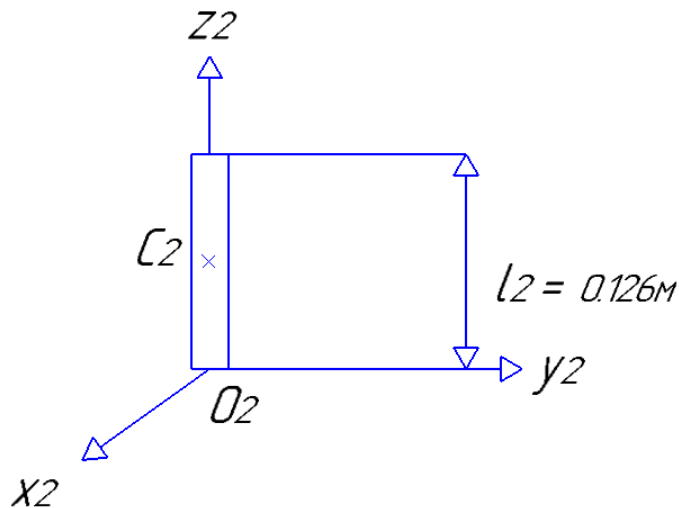


Рисунок 2.6 Друга ланка

Третя ланка (рис. 2.7) $l_3 = 0,125$ м; $m_3 = 0,092$ кг. З рисунка знаходимо вектор координат центру мас ланки C_3 в локальній системі осей $O_3x_3y_3z_3$: $r_{c_3}^{(3)} = (0; 0,203; -0,0022)^T$.

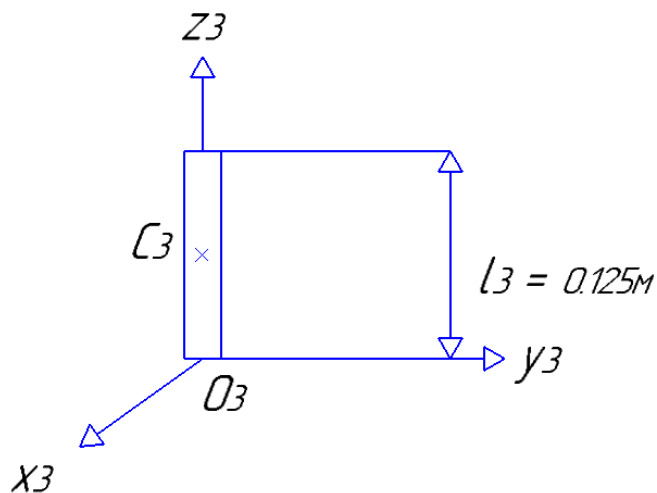


Рисунок 2.7 Третя ланка

Четверта ланка (рис.2.8) $l_4 = 0,067$ м; $l_{5y} = 0,055$ м; $l_{5z} = 0,052$ м; $m_4^0 = 0,136$ кг; $m_{5y}^0 = 0,082$ кг, $m_{5z}^0 = 0,114$ кг.

Розбиваємо ланку на три ділянки і вказуємо положення центрів мас B_1 , B_2 , B_3 ділянок. Визначаємо масу кожної ділянки:

$\mu_1 = m_4^0 = 0,136$ кг; $\mu_2 = 0,082$ кг; $\mu_3 = 0,030$ кг; $m_4 = m_4^0 + m_{5y}^0 + m_{5z}^0 = 0,332$ кг.

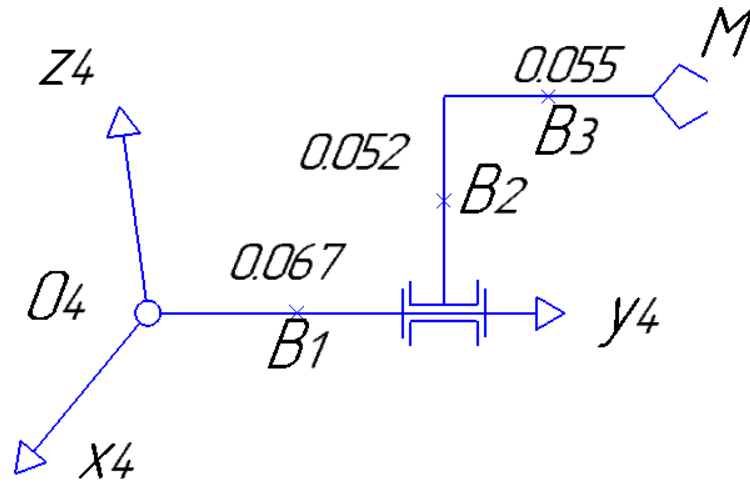


Рисунок 2.8 Четверта ланка

Записуємо вектор координат центру мас третьої ланки С4 в локальній системі осей $O_4x_4y_4z_4$: $r_{c_4}^{(4)} = (0; 0,27; 0,054)^T$.

Визначення координат центрів мас С1, С2, С3 і С4 ланок в опорній системі осей $O_0x_0y_0z_0$.

Перша ланка

$$r_{c1}^{(0)} = A_{0,1}r_{c1}^{(1)} + r_{o1}^{(0)} = \begin{pmatrix} \cos(q1) & 0 & -\sin(q1) & 0 \\ \sin(q1) & 0 & \cos(q1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.0014 \\ 0.081 \\ -0.006 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0.0014\cos(q1) & 0 & -0.0014\sin(q1) & 0 \\ 0.081\cos(q1) & 0 & -0.081\sin(q1) & 0 \\ -0.006\cos(q1) & 0 & 0.006\sin(q1) & 0 \end{pmatrix}$$

Друга ланка

$$r_{c2}^{(1)} = A_{1,2}r_{c2}^{(2)} + r_{o2}^{(1)} = \begin{pmatrix} \cos(q2) & -\sin(q2) & 0 & L2\cos(q2) \\ \sin(q2) & \cos(q2) & 0 & L2\cos(q2) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.0014 \\ 0.081 \\ -0.006 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0.001\cos(q2) & -0.001\sin(q2) & 0 & 0.001L2\cos(q2) \\ 0.14\cos(q2) & -0.14\sin(q2) & 0 & 0.14L2\cos(q2) \\ -0.002\cos(q2) & 0.002\sin(q2) & 0 & 0.002L2\cos(q2) \end{pmatrix}$$

Третя ланка

$$r_{c3}^{(2)} = A_{2,3} r_{c3}^{(3)} + r_{o3}^{(2)} = \begin{pmatrix} \sin(q3) & 0 & \cos(q3) & 0 \\ \cos(q3) & 0 & \sin(q3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ 0.0203 \\ 0.0022 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0203\sin(q3) & 0 & 0.0203\cos(q3) & 0 \\ 0.0022\sin(q3) & 0 & 0.0022\cos(q3) & 0 \end{pmatrix}$$

Четверта ланка

$$r_{c4}^{(3)} = A_{3,4} r_{c4}^{(4)} + r_{o4}^{(3)} = \begin{pmatrix} \cos(q4) & 0 & \sin(q4) & 0 \\ \sin(q4) & 0 & -\cos(q4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ 0.027 \\ 0.0054 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.027\cos(q4) & 0 & 0.027\sin(q4) & 0 \\ 0.0054\cos(q4) & 0 & 0.0054\sin(q4) & 0 \end{pmatrix}$$

Обчислення тензорів інерції ланок в точках C1, C2, C3 і C4.

Перша ланка

Зобразимо першу ланку, нанесемо центральні осі C_1xyz , що паралельні осям $O_1x_1y_1z_1$. Обчислимо осьові моменти інерції ланки.

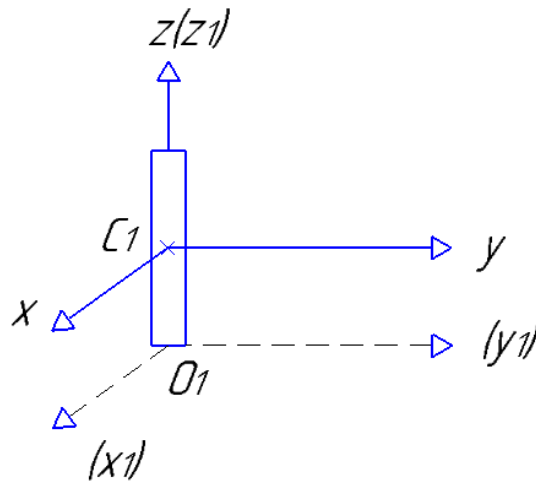


Рисунок 2.9 – Перша ланка

$$J_x = J_y = m_1 l_1^2 / 12 = 0.117 * 0.038^2 / 12 = 0.000014 \text{ кг м}^2 \quad J_z = 0.$$

Доцентрові моменти інерції ланки $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$

Отже, тензор інерції для першої ланки в точці С1 має вигляд

$$I_{c1} = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,000014 & 0 & 0 \\ 0 & 0,000014 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ кг м}^2$$

Друга ланка

Зобразимо другу ланку, нанесемо центральні осі $C_2 x_2 y_2 z_2$, що паралельні осям $O_2 x_2 y_2 z_2$. Обчислимо осьові моменти інерції ланки.

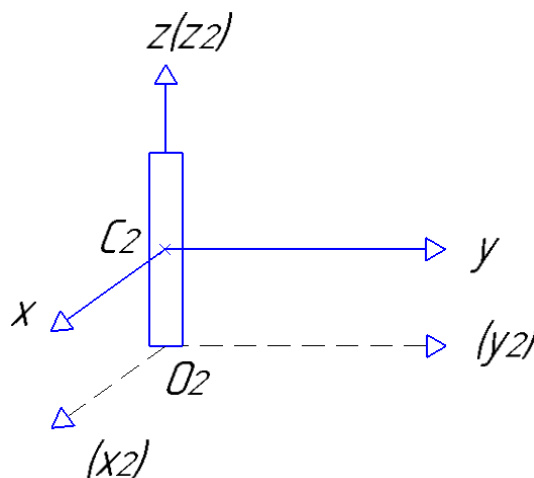


Рисунок 2.10 – Друга ланка

$$J_y = J_z = m_1 l_1^2 / 12 = 0.126 * 0.036^2 / 12 = 0.0000136 \text{ кг м}^2 \quad J_x = 0.$$

Доцентрові моменти інерції ланки $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$

Отже, тензор інерції для першої ланки в точці С2 має вигляд

$$I_{c2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0000136 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0000136 \end{pmatrix} \text{ кг м}^2$$

Третя ланка

Зобразимо третю ланку, нанесемо центральні осі $C_3 x_3 y_3 z_3$, що паралельні осям $O_3 x_3 y_3 z_3$. Обчислимо осьові моменти інерції ланки.

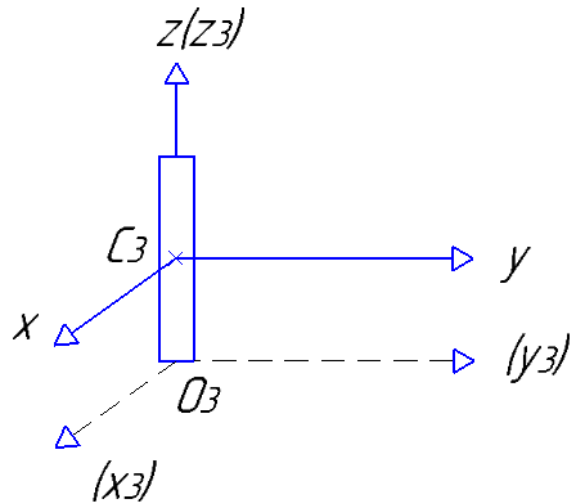


Рисунок 2.11 – Третя ланка

$$J_y = J_z = m_1 l_1^2 / 12 = 0.125 * 0.092^2 / 12 = 0.0001 \text{ кгм}^2 \quad J_x = 0.$$

Доцентрові моменти інерції ланки $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$

Отже, тензор інерції для першої ланки в точці C3 має вигляд

$$I_{c3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 \end{pmatrix} \text{ кгм}^2$$

Четверта ланка

Зобразимо четверту ланку, нанесемо центральні осі $C_4 x_4 y_4 z_4$, що паралельні осям $O_4 x_4 y_4 z_4$. Обчислимо осьові моменти інерції ланки.

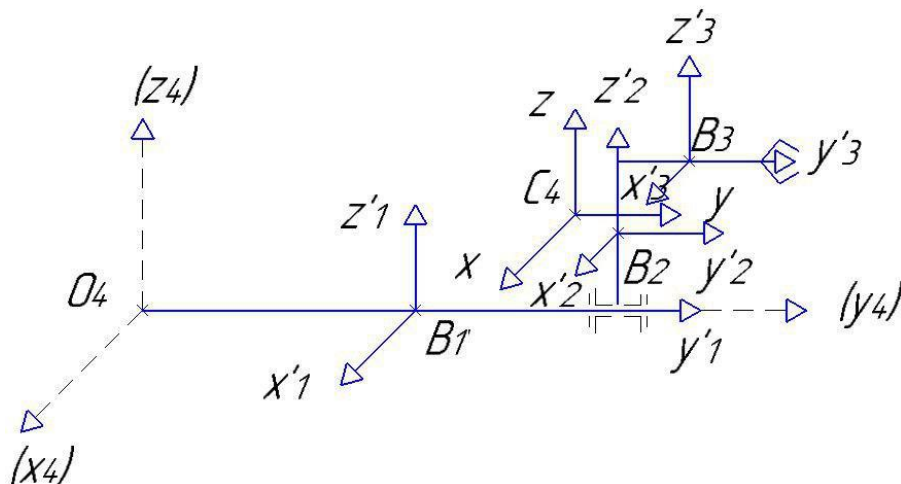


Рисунок 2.12 Четверта ланка

Наносимо центральні осі $C_4 x_4 y_4 z_4$, паралельні осям $O_4 x_4 y_4 z_4$ і з рисунку знаходимо координати центру мас ділянок B_1, B_2, B_3 в осях $C_4 x_4 y_4 z_4$ в метрах.

$$\begin{aligned}x_{B_1} &= 0 & y_{B_1} &= -0,0065 & z_{B_1} &= -0,0054 \\x_{B_2} &= 0 & y_{B_2} &= 0,04 & z_{B_2} &= -0,0206 \\x_{B_3} &= 0 & y_{B_3} &= 0,066 & z_{B_3} &= 0,0466\end{aligned}$$

Вводимо власні центральні осі кожної ділянки $B_i x'_i y'_i z'_i$,

($i = 1, 2, 3$), паралельні осях C_4xyz , і обчислюємо моменти інерції ділянок щодо

осей: $J_{x'_1} = J_{z'_1} = \mu_1 l_4^2 / 12 = 5,087 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

$$J_{x'_2} = J_{y'_2} = l_{5z}^2 / 12 = 2,067 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{x'_3} = J_{z'_3} = \mu_3 l_{5y}^2 / 12 = 2,57 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{y'_1} = J_{z'_2} = J_{y'_3} = 0$$

Всі відцентрові моменти інерції ділянок щодо власних центральних осей в силу симетрії дорівнюють нулю. За формулами Штайнера паралельного перенесення осей обчислюємо осьові моменти інерції ланки:

$$J_x = J_{x'_1} + \mu_1 (y_{B_1}^2 + z_{B_1}^2) + J_{x'_2} + \mu_2 (y_{B_2}^2 + z_{B_2}^2) + J_{x'_3} + \mu_3 (y_{B_3}^2 + z_{B_3}^2) = 4,68 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_y = J_{y'_1} + \mu_1 (x_{B_1}^2 + z_{B_1}^2) + J_{y'_2} + \mu_2 (x_{B_2}^2 + z_{B_2}^2) + J_{y'_3} + \mu_3 (x_{B_3}^2 + z_{B_3}^2) = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_z = J_{z'_1} + \mu_1 (x_{B_1}^2 + y_{B_1}^2) + J_{z'_2} + \mu_2 (x_{B_2}^2 + y_{B_2}^2) + J_{z'_3} + \mu_3 (x_{B_3}^2 + y_{B_3}^2) = 3,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Відцентрові моменти інерції ланки:

$$J_{yz} = y_{B_1} z_{B_1} \mu_1 + y_{B_2} z_{B_2} \mu_2 + y_{B_3} z_{B_3} \mu_3 = 2,95 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{xy} = J_{xz} = 0, \text{ так як всі координати } x_{B_i} \text{ дорівнюють нулю.}$$

Отже, тензор інерції четвертої ланки в точці C_4 має вигляд

$$I_{C_4} = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & -J_{yz} \\ 0 & -J_{yz} & J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,68 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1,25 \cdot 10^{-4} & -2,95 \cdot 10^{-4} \\ 0 & -2,95 \cdot 10^{-4} & 3,44 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Обчислення тензорів інерції ланок в точках O_1, O_2, O_3, O_4 .

За формулою Штайнера паралельного переноса осей із врахуванням вектора координат обчислюємо моменти інерції четвертої ланки в локальних осях $O_4x_4y_4z_4$:

Осьові моменти інерції четвертої ланки

$$J_{x_4} = J_x + m_4(y_{C_4}^2 + z_{C_4}^2) = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{y_4} = J_y + m_4(x_{C_4}^2 + z_{C_4}^2) = 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{z_4} = J_z + m_4(x_{C_4}^2 + y_{C_4}^2) = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Центробіжний момент інерції четвертої ланки

$$J_{y_4 z_4} = J_{yz} + m_4 y_{C_4} z_{C_4} = 4,96 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Отже, тензор інерції четвертої ланки в точці O_4 характеризується матрицею

$$I_{O_4} = \begin{pmatrix} J_{x_4} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_4} & -J_{y_4 z_4} \\ 0 & -J_{y_4 z_4} & J_{z_4} \end{pmatrix}_{O_4} = \begin{pmatrix} 2,89 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 2,18 \cdot 10^{-4} & -4,96 \cdot 10^{-4} \\ 0 & -4,96 \cdot 10^{-4} & 2,67 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}_{O_4}$$

Осьові моменти інерції третьої ланки

$$J_{x_3} = J_x + m_3(y_{C_3}^2 + z_{C_3}^2) = 4,68 \cdot 10^{-4} + 0,092 \cdot (0,0203^2 + 0,0022^2) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{y_3} = J_y + m_3(x_{C_3}^2 + z_{C_3}^2) = 1,25 \cdot 10^{-4} + 0,092 \cdot 0,0022^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{z_3} = J_z + m_3(x_{C_3}^2 + y_{C_3}^2) = 3,44 \cdot 10^{-4} + 0,092 \cdot 0,0203^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Доцентрові моменти інерції ланки

$$J_{yz} = J_{xz} = 0$$

Запишемо тензор інерції третьої ланки

$$I_{O_2} = \begin{pmatrix} J_{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z_2} \end{pmatrix}_{O_2} = \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}_{O_2}$$

Осьові моменти інерції другої ланки

$$J_{x_2} = J_x + m_2(y_{C_2}^2 + z_{C_2}^2) = 4,68 \cdot 10^{-4} + 0,036 \cdot (0,14^2 + 0,0002^2) = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{y_2} = J_y + m_2(x_{C_2}^2 + z_{C_2}^2) = 1,25 \cdot 10^{-4} + 0,036 \cdot (0,001^2 + 0,0002^2) = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{z_2} = J_z + m_2(x_{C_2}^2 + y_{C_2}^2) = 3,44 \cdot 10^{-4} + 0,036 \cdot (0,001^2 + 0,14^2) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Доцентрові моменти інерції ланки

$$J_{yz} = J_{xz} = 0$$

Запишемо тензор інерції третьої ланки

$$I_{O_2} = \begin{pmatrix} J_{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z_2} \end{pmatrix}_{O_2} = \begin{pmatrix} 1,2 * 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 1,3 * 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 1 * 10^{-3} \end{pmatrix}_{O_2}$$

Осьові моменти інерції першої ланки

$$J_{x_1} = J_x + m_1(y_{c_1}^2 + z_{c_1}^2) = 4,68 * 10^{-4} + 0,038 * (0,081^2 + 0,0006^2) = 7,1 * 10^{-4} \text{ кг*м}^2$$

$$J_{y_1} = J_y + m_1(x_{c_1}^2 + z_{c_1}^2) = 1,25 * 10^{-4} + 0,038 * (0,0014^2 + 0,0006^2) = 5 * 10^{-4} \text{ кг*м}^2$$

$$J_{z_1} = J_z + m_1(x_{c_1}^2 + y_{c_1}^2) = 3,44 * 10^{-4} + 0,038 * (0,0014^2 + 0,081^2) = 7,2 * 10^{-4} \text{ кг*м}^2$$

Доцентрові моменти інерції ланки

$$J_{yz} = J_{xz} = 0$$

Запишемо тензор інерції третьої ланки

$$I_{O_1} = \begin{pmatrix} J_{x_1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_1} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z_1} \end{pmatrix}_{O_1} = \begin{pmatrix} 7,1 * 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 5 * 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 7,2 * 10^{-4} \end{pmatrix}_{O_1}$$

2.3 Опис конструкції маніпулятора

Для моделювання конструкції маніпулятора було обрано середовище SolidWorks 2018, оскільки він має широкий базовий функціонал, доступний без установки розширень.

У конструктивному плані даний промисловий робот характеризується тим, що його маніпулятор володіє шістьма ступенями свободи, що забезпечуються виключно на обертальних з'єднаннях. Рух маніпулятора схожий на рух людської руки, яка має суглоби, плече, передпліччя і кисть.

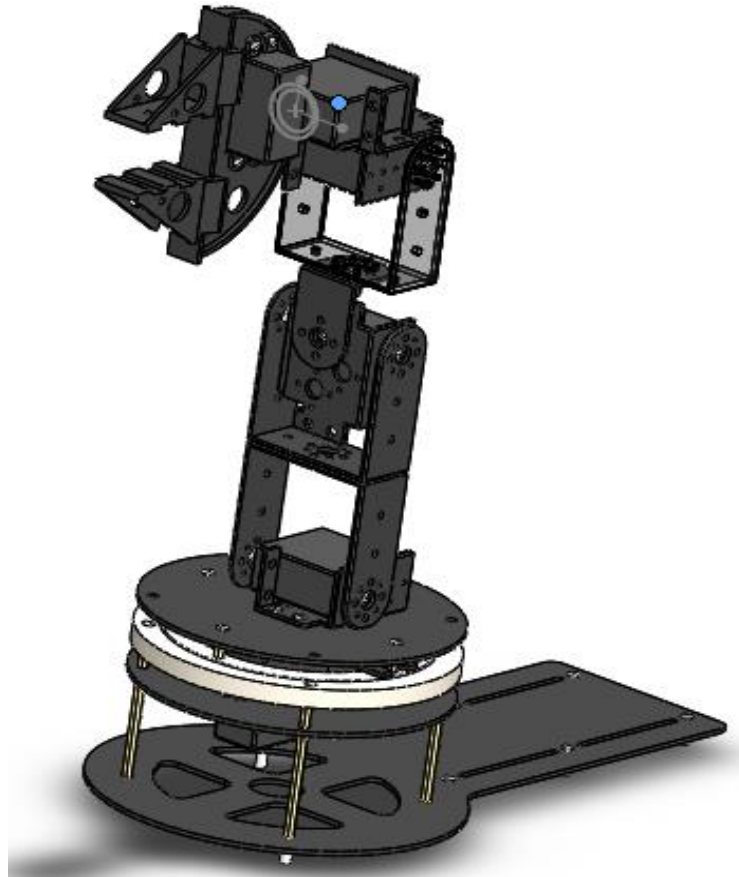


Рисунок 2.13 3D модель маніпулятора

Маніпулятор складається з:

1. Основа макету
2. Елементи кріплення (болти, гайки, латунні стійки)
3. Кріпильний диск для сервопривода
4. Шарикопідшипник
5. Кріпильний диск
6. Сервопривід
7. Статичний кронштейн
8. Обертовий кронштейн
9. Кронштейн
10. Основа хвата
11. Губки хвата

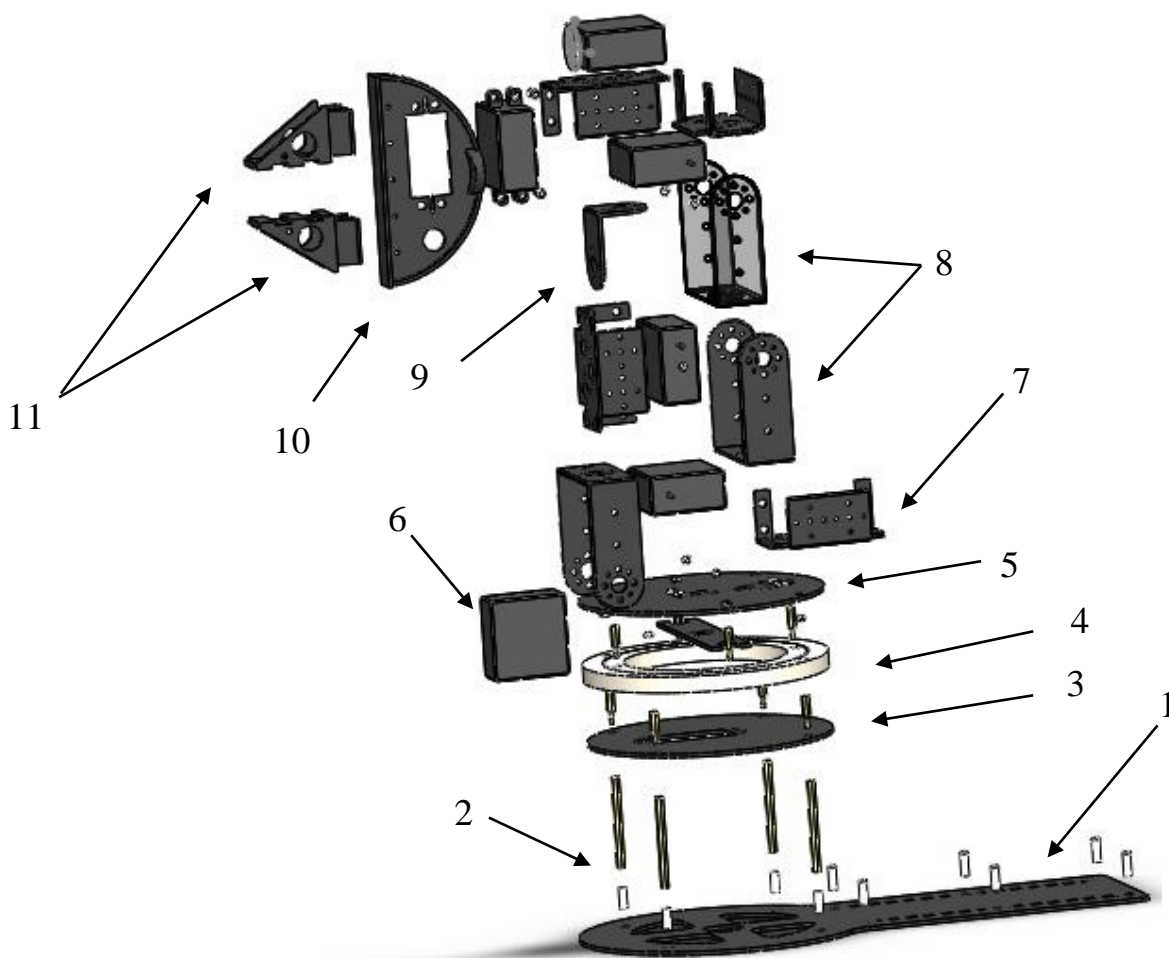


Рисунок 2.14 Елементи маніпулятора

Першим кроком створення 3D моделі маніпулятора є створення основи макету (1), до якої кріпляться кріпильні диски (3, 5) для шарикопідшипника за допомогою латунних стійок (2) та болтів. До кріпильного диску (3) прикріплюється перший сервопривід (6), який приводить до руху шарикопідшипник (4). Шарикопідшипник обертає кріпильний диск (5) і відповідно все тіло маніпулятора.

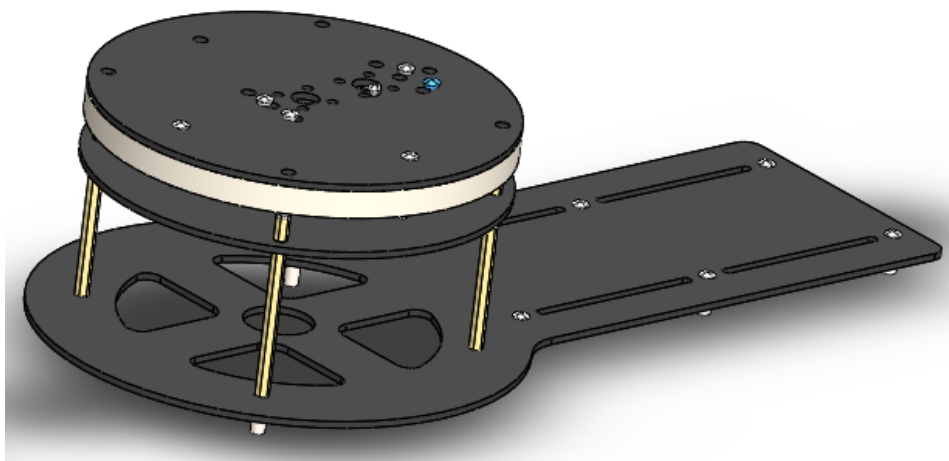


Рисунок 2.15 Основа макету

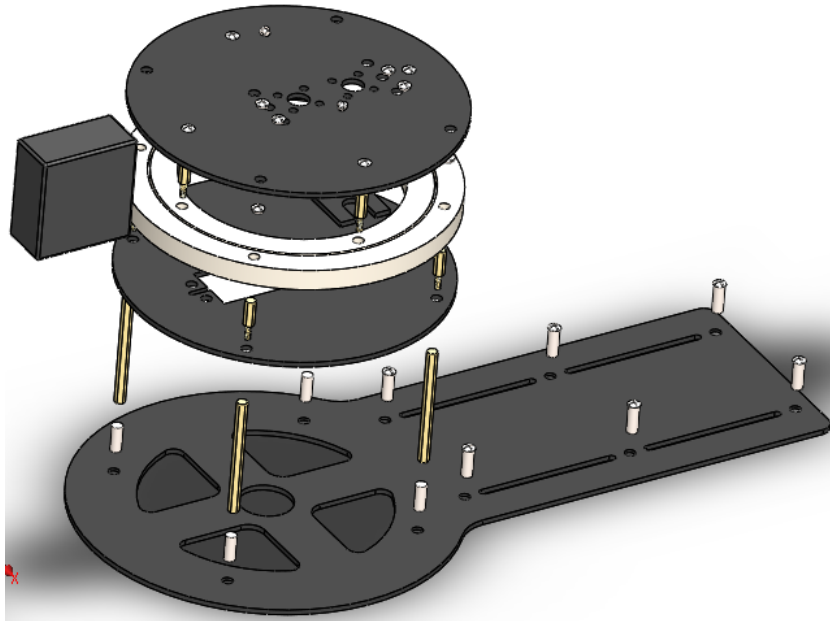


Рисунок 2.16 Зборка основи макету

Коли основу завершено, можна приступити до створення тіла маніпулятора. До кріпильного диску (5) під'єднуємо статичний кронштейн (7), до якого приєднується другий сервопривід та обертовий кронштейн (8). Статичний кронштейн, сервопривід утворюють суглоб маніпулятора, а два обертових кронштейни утворюють плече. Суглоб маніпулятора виконує обертовий рух, аналогічний руху суглобу людської руки.

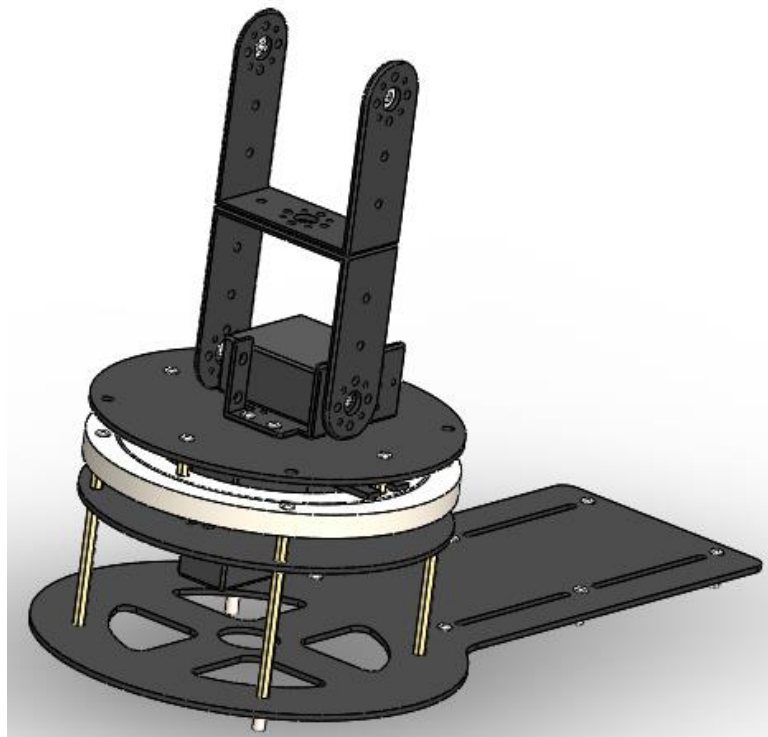


Рисунок 2.17 Плече маніпулятора

До вже створеного суглобу маніпулятора кріпимо статичний кронштейн, до якого в свою чергу кріпимо сервопривід, який рухає передпліччя. Передпліччя складається з двох обертових кронштейнів.

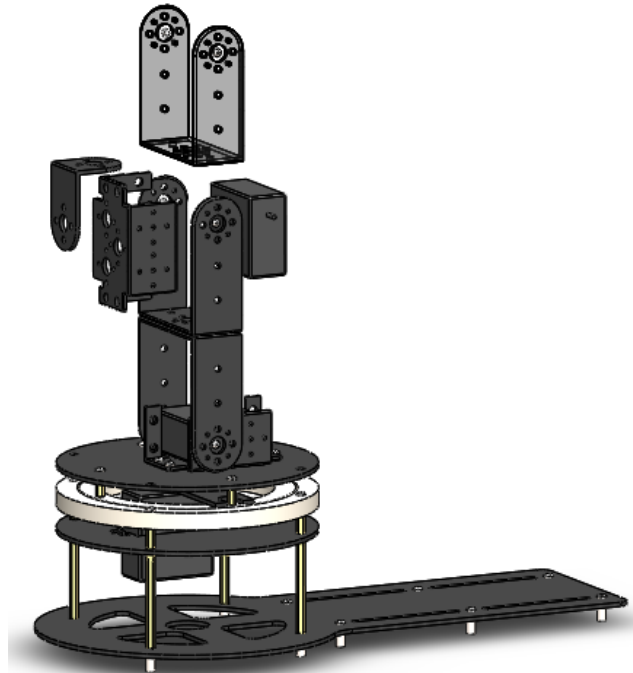


Рисунок 2.18 Передпліччя маніпулятора

Передпліччя і зап'ястя із хватом маніпулятора пов'язує суглоб, який складається з двох статичних кронштейнів. Забезпечують рух даного суглоба і так зване зап'ястя із хватом два сервоприводи, які кріпляться за допомогою кронштейнів.

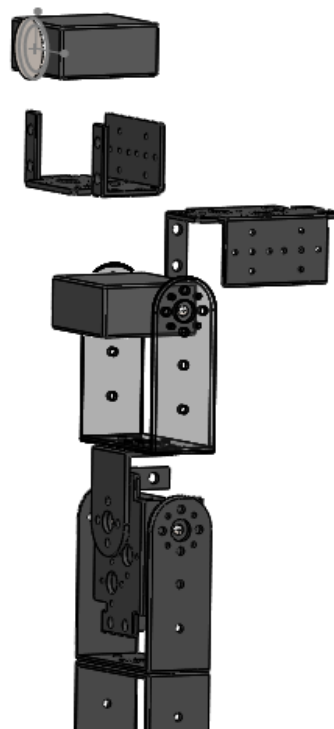


Рисунок 2.18 Передпліччя та суглоб маніпулятора

Остання складова даного маніпулятора – це хват. Він включає в себе підставку для хвата, одну пару губок хвата та сервопривід, який приводить в дію губки.

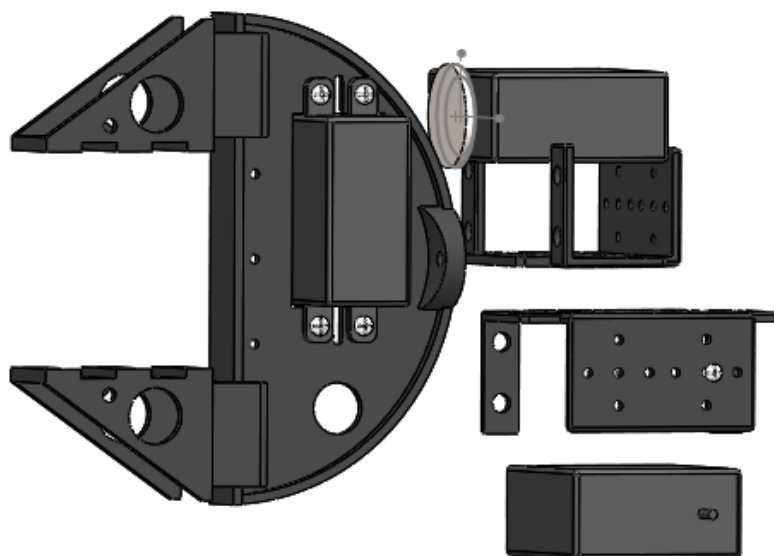


Рисунок 2.19 Хват маніпулятора

ВИСНОВОК

В ході виконання дипломного проекту були розглянуті різні варіації комплектування макету промислового робота та обрані оптимальні програмні засоби для виконання поставленого завдання.

Було проведено розрахунок інерційних характеристик промислового маніпулятора, створена та розглянута кінематична схема роботи маніпулятора.

В середовищі 3D моделювання SolidWorks було розроблено просторову модель макета промислового маніпулятора SolidWorks, було створено деталювання та креслення основних деталей та маніпулятора в цілому.

Підводячи підсумки можна підмітити, що правильний вибір середовища розробки просторової моделі і створення креслень надає більш широкі можливості для роботи з 3D моделлю і подальших розрахунків на її основі.

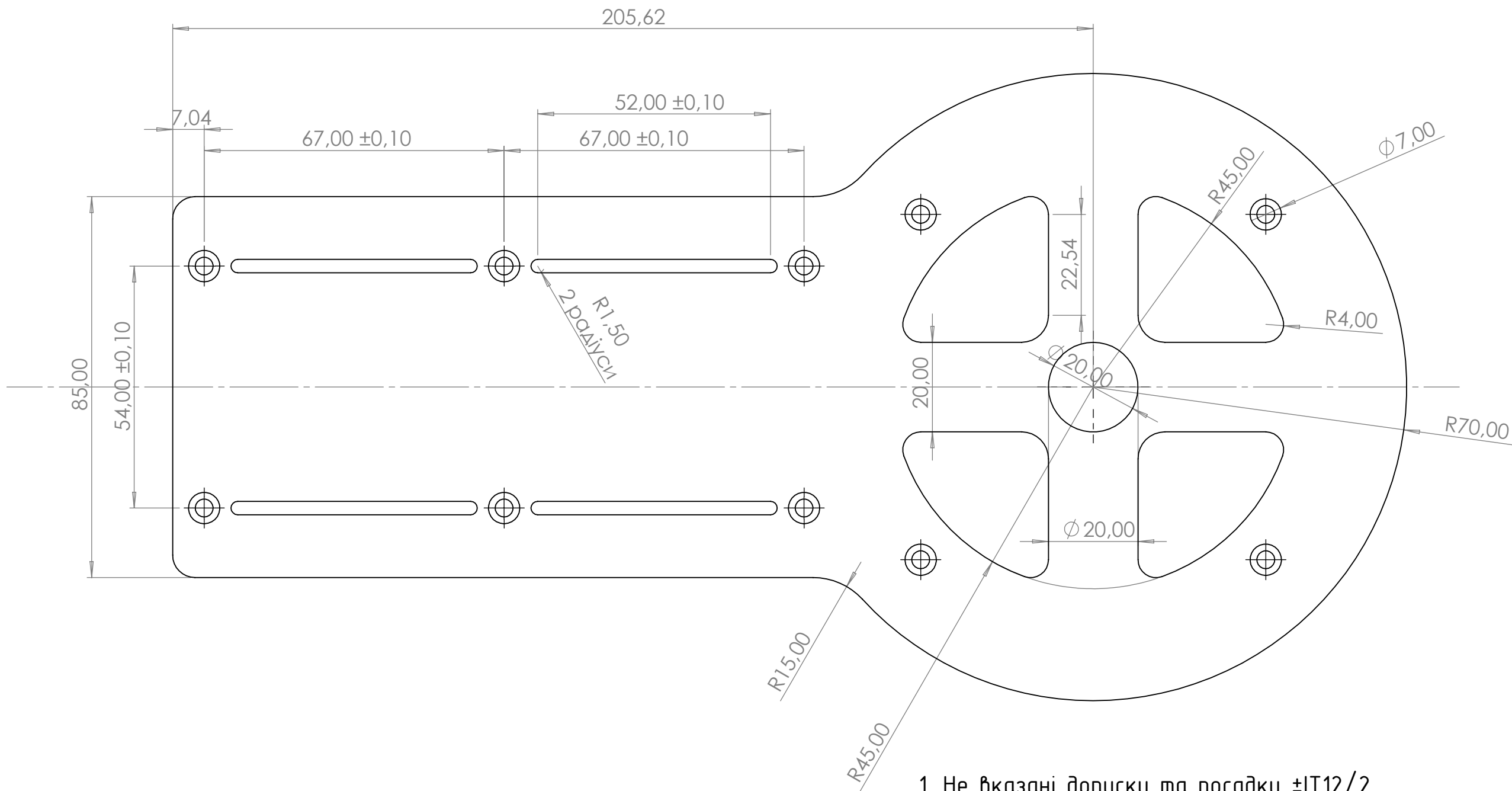
Список використаної літератури

1. Промышленные роботы и манипуляторы [электронный ресурс]. Режим доступа: http://cncnc.ru/documentation/theory_of_mechanismus_and_machines/lect_19 (дата звернення: 25.04.2019).
2. Промышленный робот [электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный_робот (дата звернення 25.04.2019)
3. Манипуляционные роботы [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://refleader.ru/jgeyfsrnarna> (дата звернення: 25.04.2019).
4. Лекции по УРиПТС [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/dir/cat39/subj1292/file13007/view135824/page2> (дата звернення: 25.04.2019).
5. Схиртладзе А.Г., Выходец В.И. Оборудование машиностроительных предприятий. – М.: РПК «Политехник», 2005. – 92 с.
6. Компьютерное моделирование [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.inf1.info/book/export/html/215> (дата звернення: 03.05.2019).
7. Гонсалес Р., Фу К., Ли К. Робототехника. – М.: Москва «Мир», 1989. – 620 с.
8. Обзор популярных систем автоматизированного проектирования (CAD) [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pointcad.ru/novosti/obzor-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya> (дата звернення: 03.05.2019).
9. Система автоматизированного проектирования [электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_автоматизированного_проектирования#История_CAD (дата звернення: 03.05.2019).
10. Обзор программы AutoCad [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zwsoft.ru/stati/obzor-programmy-autocad> (дата звернення: 04.05.2019).
11. Bricscad [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Bricscad> (дата звернення: 04.05.2019).

12. Что такое BricsCAD? [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://briscad-ukraine.com.ua/briscad/briscad-about.html> (дата звернення: 04.05.2019).
13. BricsCAD [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plmpedia.ru/wiki/BricsCAD> (дата звернення: 04.05.2019).
14. SolidWorks [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (дата звернення: 04.05.2019).
15. SolidWorks 2016: краткий обзор программы [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-obzor/obzor-programmy-solidworks/> (дата звернення: 04.05.2019).
16. Компас(САПР) [электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Компас_\(САПР\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Компас_(САПР)) (дата звернення: 04.05.2019).
17. САПР Компас-3D: обзор для новичков [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-obzor/obzor-kompas-3d/> (дата звернення: 04.05.2019).
18. КОМПАС (САПР) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/144491> (дата звернення: 04.05.2019).
19. САПР CATIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vokb-la.spb.ru/soft/catia.html> (дата звернення: 04.05.2019).
20. Кинематика манипулятора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scicenter.online/avtomatizatsiya-scicenter/kinematika-manipulyatora-125679.html> (дата звернення: 08.05.2019).
21. Кинематика: прямая и обратная задачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robocraft.ru/blog/mechanics/756.html> (дата звернення: 08.05.2019).
22. Лекция 2. Кинематика манипулятора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/985240/page:4/> (дата звернення: 08.05.2019).
23. NX (система автоматизированного проектирования) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_\(система_автоматизированного_проектирования\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_(система_автоматизированного_проектирования)) (дата звернення: 05.05.2019).

24. PTC Creo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/PTC_Creo (дата звернення: 05.05.2019).
25. PTC Creo Parametric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irisoft.ru/products/creo/ptc-creo-parametric/> (дата звернення: 05.05.2019).
26. Лучшее программное обеспечение 3D CAD для конструирования изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ptc.com/ru/products/cad/creo> (дата звернення: 05.05.2019).
27. Робототехника в Украине: разработки и перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dou.ua/lenta/articles/robotics-in-ukraine/> (дата звернення: 09.05.2019).
28. Где в Украине людей заменяют роботами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ubr.ua/amp/gde-v-ukraine-ludei-zameniaut-robotami-3807646> (дата звернення: 09.05.2019).
29. Работа в век роботов. Какие новые профессии появляются в украинской промышленности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://project.liga.net/projects/robots/> (дата звернення: 09.05.2019).
30. Прямая задача кинематики. Описание робота-манипулятора. Представление Денавита - Хартенберга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studbooks.net/2410885/informatika/pryamaya_zadacha_kinematiki (дата звернення: 09.05.2019).
31. Представление Денавита - Хартенберга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/985240/page:9/> (дата звернення: 09.05.2019).

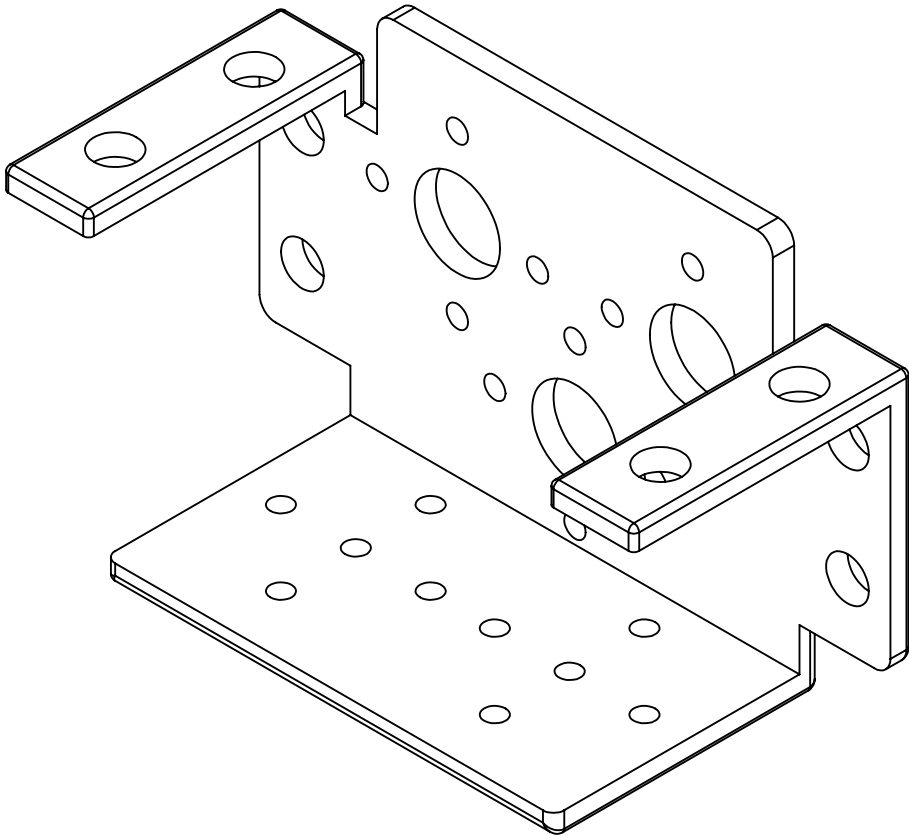
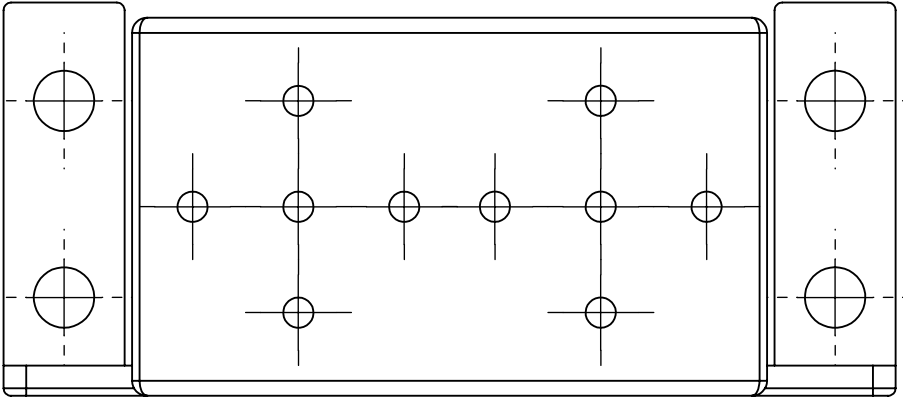
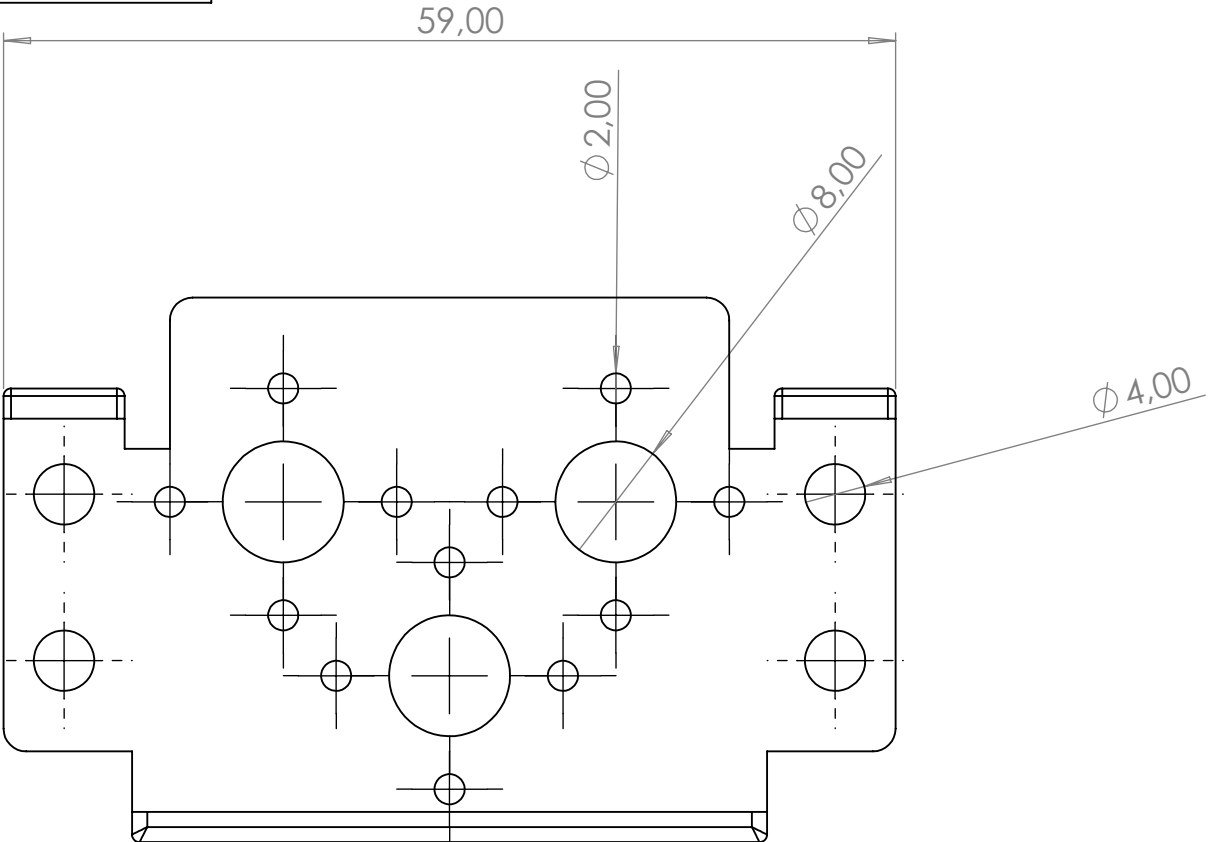
Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	



1. Не вказані допуски та посадки $\pm IT12/2$
2. Правити на рифленій плиті
3. Покрити емалю ПФ-115 ГОСТ 6465-76
4. На внутрішніх поверхнях основи не допускається наявність заусенець.

					ПГп-61.07.1739.001				
					Основа макету	Лит.		Масса	Масштаб
								0,10	1:1
						Лист		Листов	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Д16Т ГОСТ 4784-97	ПБФ, каф. ПСОН			
Разраб.	Лещук М.С.								
Пров.	Лакоза С.Л.								
Т. контр.									
Н. контр.									
Утв.									

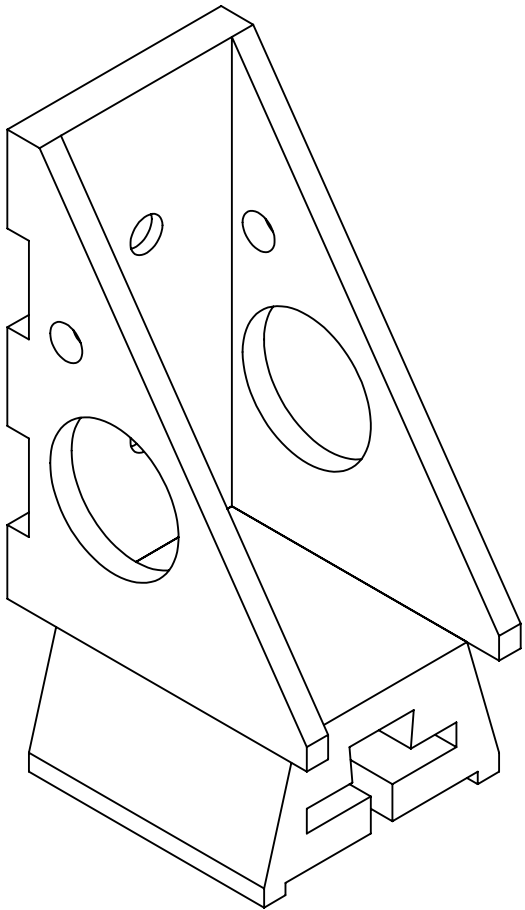
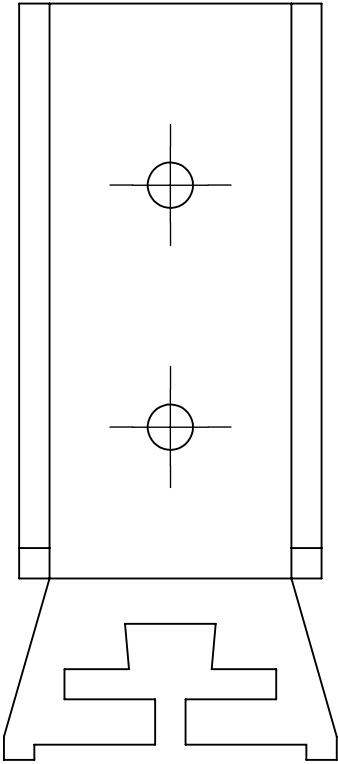
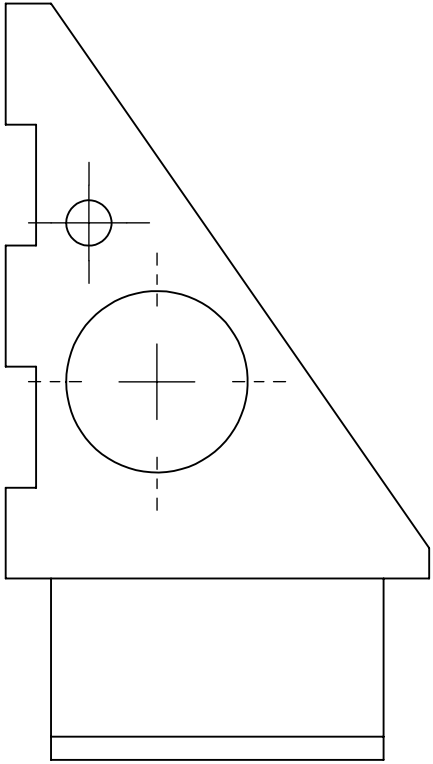
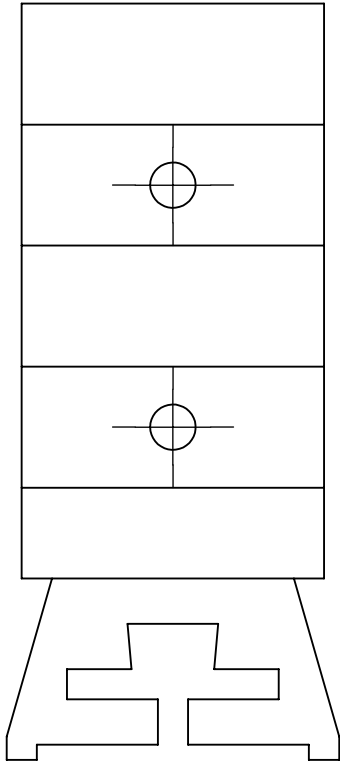
Инв. № подл.		Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Справ. №



					ПГп-61.04.1739.002					
					Кронштейн	Лит.			Масса	Масштаб
									0.01	1:2
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.	Лещук М.С.									
Пров.	Лакоза С.Л.									
Т. контр.					Лист			Листов		
					С (Graphite)					
Н. контр.										
Утв.										

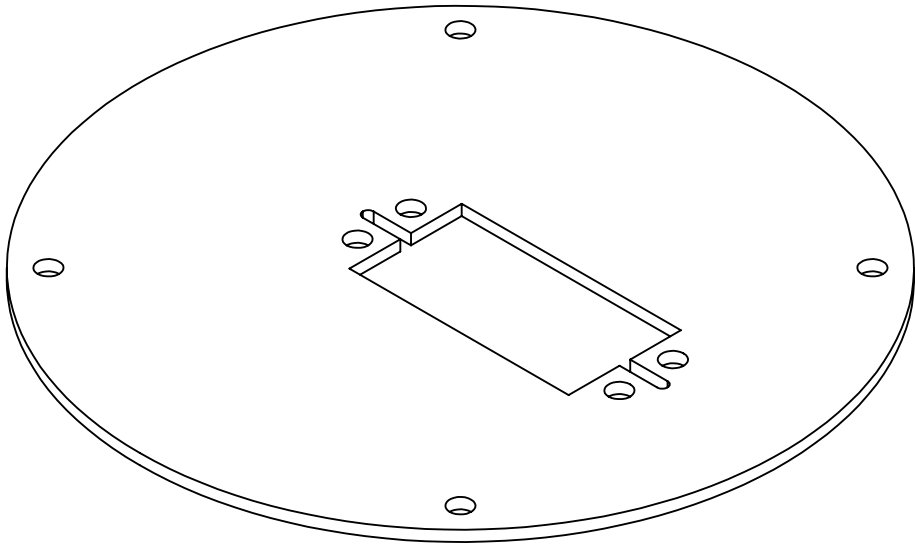
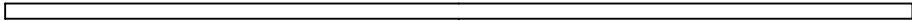
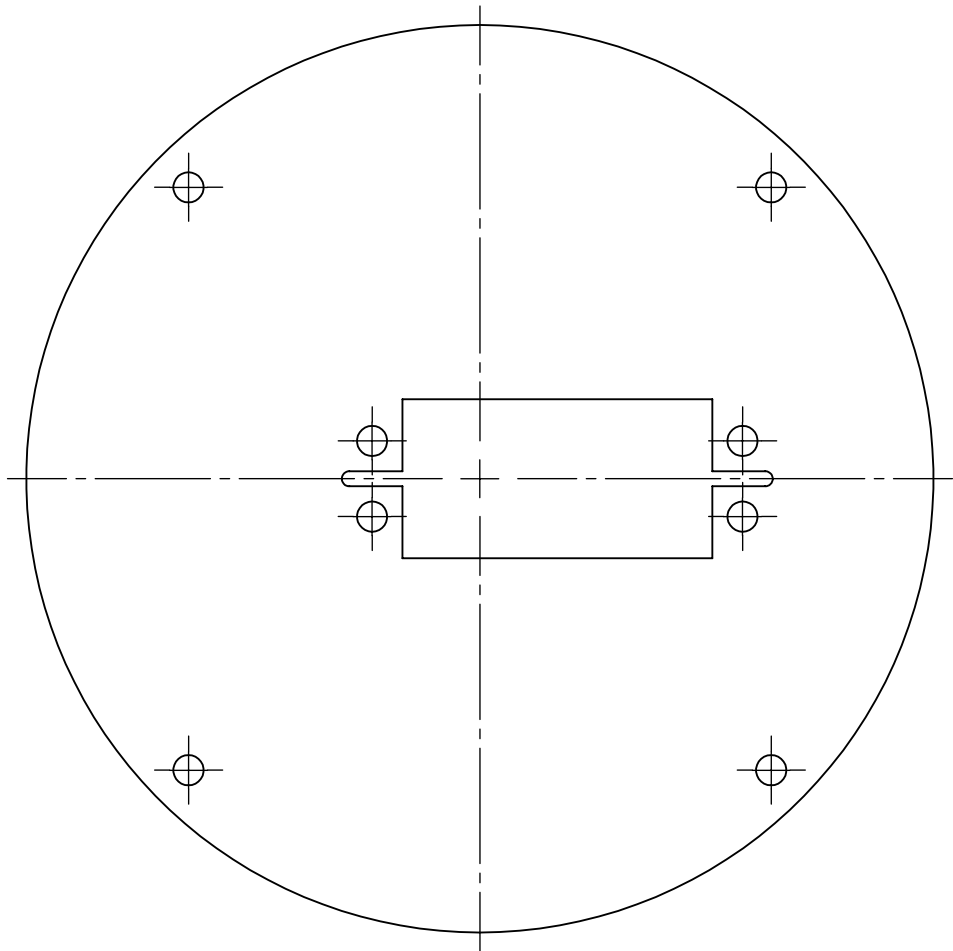
Справ. №	

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

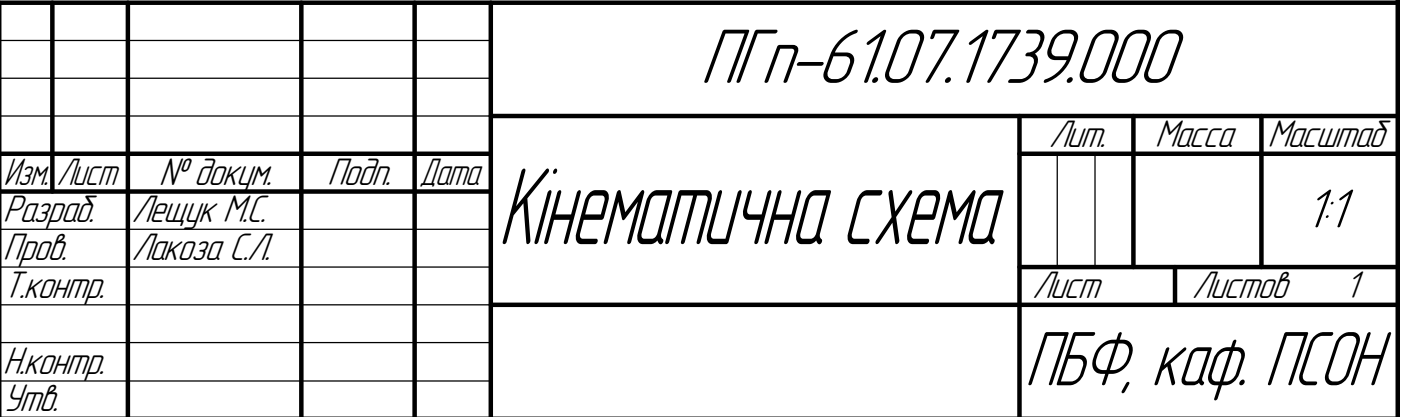


									Лит.		Масса	Масштаб		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата								0.02		
Разраб.														
Пров.														
Т. контр.									Лист		Листов			
					С (Graphite)									
Н. контр.														
Утв.														

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Справ. №	



								Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.									0.05	
Пров.										
Т. контр.								Лист	Листов	
Н. контр.										
Утв.										
					С (Graphite)					
					1 Копировал			Формат А3		



4

3

2

1

В

В

А

Пер. примен.

Стр. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

Взам. инв. №

Изм. № дубл.

Подп. и дата

Изм. № подл.

1. Губки хвата
2. Основа хвата
3. Сервопривід
4. Статичний кронштейн
5. Обертовий кронштейн
6. Кронштейн
7. Кріпильний диск
8. Шарикопідшипник
9. Кріпильний диск для сервопривода
10. Елементи кріплення
11. Основа макету

1. Губки хвата
2. Основа хвата
3. Сервопривід
4. Статичний кронштейн
5. Обертовий кронштейн
6. Кронштейн
7. Кріпильний диск
8. Шарикопідшипник
9. Кріпильний диск для сервопривода
10. Елементи кріплення
11. Основа макету

						ПГ-п61.07.1739.001				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Просторова модель та її рознесена схема			Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Лещук М.С.								1.06	1:1
Пров.	Лакоза С.Л.							Лист		Листов
Т. контр.										
Н. контр.					Д16Т ГОСТ 4784-97			ПБФ, каф. ПСОН		
Утв.										

1

Копировал

Формат А1